

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Judita GRAŽULYTĖ

BITUMO ĮTEMPIŲ RELAKSACIJOS  
MODULIO TAIKYMAS ASFALTO DANGŲ  
ATSPARUMUI TEMPERATŪRINIAMS  
PLYŠIAMS VERTINTI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2019

Disertacija rengta 2015–2019 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

### **Vadovas**

prof. dr. Audrius VAITKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

### **Pirmininkas**

doc. dr. Darius BAČINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

### **Nariai:**

dr. Valentin ANTONOVIČ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008),

doc. dr. Artūras KERŠYS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – T 003),

habil. dr. Sabine Jutta LEISCHNER (Dresdeno technikos universitetas, Vokietija, statybos inžinerija – T 002),

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2019 m. gruodžio 17 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2019 m. lapkričio 15 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2019-053-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-205-5

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2019

© Judita Gražulytė, 2019

[judita.grazulyte@vgtu.lt](mailto:judita.grazulyte@vgtu.lt)

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Judita GRAŽULYTĖ

BITUMEN STRESS RELAXATION  
MODULUS AS AN INDICATOR OF  
ASPHALT PAVEMENTS RESISTANCE TO  
LOW TEMPERATURE CRACKING

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
CIVIL ENGINEERING (T 002)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2019

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2015–2019.

**Supervisor**

Prof. Dr Audrius VAITKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

**Chairman**

Assoc. Prof. Dr Darius BAČINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

**Members:**

Dr Valentin ANTONOVIČ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008),

Assoc. Prof. Dr Artūras KERŠYS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – T 003),

Dr Habil. Sabine Jutta LEISCHNER (Dresden University of Technology, Germany, Civil Engineering – T 002),

Prof. Dr Habil. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 17 December 2019**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 15 November 2019.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

# Reziumė

Siekiant išvengti temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose, būtina asfalto mišinio gamybai parinkti temperatūriniais plyšiams atsparų bitumą, o nesant galimybei susidariusius plyšius tinkamai taisyti ir prižiūrėti. Dėl netinkamai taisomų ir prižiūrimų temperatūrinių plyšių trumpėja dangos eksploatavimo laikotarpis ir didėja kelių priežiūros lėšų sąnaudos. Siekiant efektyviai panaudoti kelių priežiūrai skiriamas lėšas ir užtikrinti temperatūriniais plyšiams atsparų asfalto dangos funkcionavimą, būtina sukurti bitumo parinkimo algoritmą asfalto dangų atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti.

Disertacijos tikslas – nustatyti bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribines sąlygas temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu. Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacijos, literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas, santrauka anglų kalba ir devyni priedai. Įvade formuluojama problema, aprašomas darbo aktualumas, tyrimų objektas, pateikiamas darbo tikslas ir uždaviniai, tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas ir darbo rezultatų mokslinė reikšmė, pateikiami ginamieji teiginiai bei darbo struktūra. Pirmame skyriuje pateikiama temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose samprata bei atlikta bitumo ir asfalto mišinių tyrimo metodų ir kriterijų, apibrėžiančių temperatūrinių plyšių susidarymą, analizė. Siekiant apiboti temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose sukurtas teorinis algoritmas vertinti asfalto dangų atsparumą temperatūriniais plyšiams ir atliktas eksperimentinis tyrimas jo validacijai, aprašytas antrame skyriuje. Skyriuje analizuotas temperatūrinių plyšių intensyvumas, žemiausios asfalto dangos temperatūros tiriamuosiuose keliuose su asfalto danga ruožuos ir įvertintos bitumo savybės (tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos, įtempių relaksacijos modulis ir jo kitimo rodiklis). Trečiame skyriuje nustatytos bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinės sąlygos temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu bei patikslintas teorinis algoritmas. Skyriuje pateiktas šio algoritmo taikymas bitumo parinkimui atsižvelgiant į žemiausią asfalto dangos temperatūrą ir apskaičiuotas algoritmo taikymo ekonominis efektas.

Disertacijos tema yra atspausdinta 13 mokslinių straipsnių: 7 – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę, 2 – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose *Clarivate Analytics* duomenų bazės „*Conference Proceedings*“ leidiniuose, 4 – kituose tarptautinių konferencijų leidiniuose.

# Abstract

In order to prevent the formation and development of low temperature cracks in asphalt pavements, it is necessary to select a bitumen for the asphalt mixture production that is resistant to low temperature cracking and, if it is not available, to repair and properly maintain the appeared cracks. Improperly repaired and maintained low temperature cracks result in a shortened pavement lifetime and increased costs for the maintenance. To efficiently use the funds allocated for the maintenance of roads and to ensure the asphalt pavement's resistant to low temperature cracking, it is necessary to create a bitumen selection algorithm designed for the evaluation of asphalt pavement resistance to low temperature cracking.

The aim of this thesis is to determine the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope considering the formation and development of low temperature cracks in the asphalt pavements. The thesis consists of an introduction, three sections, general conclusions and recommendations, references and a list of scientific publications by the author on the topic of the thesis, as well as a summary in the English and nine annexes. In the introduction, the problem is formed, the relevance of the thesis is described, the object of the thesis is provided along with the aim and tasks, the research methodology, scientific novelty and practical value of the research findings are also provided, and the defended statements and structure of the thesis are given. The first chapter provides the concept of low temperature cracking in asphalt pavements, as well as bitumen and asphalt mixture test methods that define the formation of low temperature cracks. In order to limit low temperature cracking, a theoretical algorithm is created to evaluate the asphalt pavement resistance to low temperature cracking and an experimental research is conducted to validate that algorithm, which are described in the second chapter. An analysis of the severity of low temperature cracking and the lowest surface temperatures of the asphalt pavements are included. Also, the chapter includes an evaluation of the bitumen properties (limits of the linear viscoelastic behaviour range, the stress relaxation modulus and its slope). The third chapter provides a determination of the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope, with respect to the formation and development of low temperature cracks in the asphalt pavements and a revised theoretical algorithm. The application of this algorithm for the selection of bitumen with regard to the lowest surface temperature of the asphalt pavement, and the estimated economic effect of the application of the algorithm are included.

On the topic of the thesis, 13 scientific articles were published: 7 – in scientific journals included in the *Clarivate Analytics Web of Science*, 2 – in the *Clarivate Analytics Proceedings* data base publications, 4 – in the scientific conferences materials.

---

# Žymėjimai

## Simboliai

$G(t)$  – bitumo įtempių relaksacijos modulis laiko momentu  $t$ ;

$G_D$  – išsklaidymo energija;

$G_f$  – irimo energija;

$K_{Ic}$  – įtempių intensyvumo koeficientas;

$m_r(t)$  – bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklis laiko momentu  $t$ ;

$t$  – laikas nuo bandinio apkrovimo pradžios;

$T$  – temperatūra;

$T_{cr}$  – žemiausia kritinė temperatūra;

$T_{cr, bandymo}$  – bandymų metu nustatyta kritinė temperatūra;

$w_e$  – efektyvusis darbas;

$w_p$  – plastiškasis darbas.

$\varepsilon$  – bandiniui suteiktos pastoviosios deformacijos;

$\sigma(t)$  – įtempiai bandinyje laiko momentu  $t$ ;

$\omega$  – dažnis.

## Santrumpos

4-mm DSR bandymas – bandymas dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens plokštelėmis (angl. *test with dynamic shear rheometer with 4 mm parallel plates*);

ABCD bandymas – bandymas bitumo plyšio formavimosi prietaisu (angl. *test with asphalt binder cracking device*);

ACCD bandymas – bandymas asfalto mišinio pleišėjimo prietaisu (angl. *test with asphalt concrete cracking device*);

ATCA bandymas – bandymas asfalto mišinio temperatūrinių plyšių susidarymo analizatoriumi (angl. *test with asphalt thermal cracking analyser*);

BBR bandymas – bandymas lenkiamo strypelio reometru (angl. *test with bending beam rheometer*);

BVP – bendrasis vidaus produktas (angl. *gross domestic products*);

DC(T) bandymas – disko formos įpjauto bandinio tempimo bandymas (angl. *disc-shaped compact tension test*);

DENT bandymas – bandymas grynojo tempimo prietaisu taikant ties bandinio viduriu skersine kryptimi nuo abiejų kraštų link vidurio įpjautą bandinį (angl. *double-edge notched test*);

DSR – dinaminis šlyties reometras (angl. *dynamic shear rheometer*);

DT bandymas – bandymas grynojo tempimo prietaisu (angl. *direct tension test*);

ESAs – ekvivalentinių standartinių (10 t svorio) ašių apkrovų bendra suma (angl. *equivalent single axle loads*);

ExBBR bandymas – išplėstinis bandymas lenkiamo strypelio reometru (angl. *extended bending beam rheometer test*);

GDV – grynoji dabartinė vertė (angl. *net present value*);

IDT bandymas – bandymas netiesioginio tempimo prietaisu (angl. *indirect tensile test*);

KOS stotelė – kelių oro sąlygų stotelė (angl. *road weather station*);

LVE ribos – tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos (angl. *linear viscoelastic range*);

N/S – naudos ir sąnaudų santykis (angl. *benefit-cost ratio*);

PAV – metodas, imituojantis ilgalaikį bitumo sendinimo procesą naudojant slėginį sendinimo indą (angl. *Pressure Ageing Vessel*);

PG – bitumo eksploatacinių charakteristikų reikalavimai (angl. *performance grade specifications*);

RTFOT – metodas, imituojantis trumpalaikį bitumo sendinimo procesą veikiant šilumai ir orui (angl. *Rolling Thin Film Test*);

SCB – pusapvalio bloko lenkimo bandymas su ties bandinio viduriu iš apačios link viršaus įpjautu bandiniu (angl. *semi-circular bending test*);

SE(B) bandymas – lenkimo bandymas veikiant vienai koncentruotai apkrovai su ties bandinio (sijos) viduriu iš apačios link viršaus įpjautu bandiniu (angl. *single-edge-notched beam test*);



SENB bandymas – bandymas lenkiamo strypelio reometru taikant ties bandinio (sijelės) viduriu iš apačios link viršaus įpjautą bandinį (angl. *single-edge notched bending test*);  
SHRP – strateginė kelių tyrimo programa (angl. *Strategic Highway Research Program*);  
SNA – sąnaudų ir naudos analizė (angl. *cost-benefit analysis*);  
TSRST – bandymas vienašio tempimo prietaisu ribojant (varžant) asfalto mišinio traukimąsi (angl. *thermal stress restrained specimen test*);  
VGN – vidinė grąžos norma (angl. *internal rate of return*).



---

# Turinys

IVADAS .....	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas .....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai .....	3
Tyrimų metodika .....	4
Darbo mokslinis naujumas .....	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė .....	4
Ginamieji teiginiai .....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
Padėka .....	6
1. TEMPERATŪRINIŲ PLYŠIŲ SUSIDARYMĄ ASFALTO DANGOSE APIBRĖŽIANČIŲ METODŲ ANALIZĖ .....	7
1.1. Temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose samprata .....	8
1.2. Bitumo tyrimo metodai ir kriterijai, apibrėžiantys temperatūrinių plyšių susidarymą .....	10
1.2.1. Kontinuumo mechanika paremti tyrimo metodai.....	11
1.2.2. Irimo mechanika paremti tyrimo metodai .....	15
1.2.3. Akustine emisija paremti tyrimo metodai .....	17

1.2.4. Kriterijai bitumo atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti.....	18
1.3. Asfalto mišinių tyrimo metodai ir kriterijai, apibrėžiantys temperatūrinių plyšių susidarymą .....	23
1.3.1. Kontinuumo mechanika paremti tyrimo metodai.....	23
1.3.2. Irimo mechanika paremti tyrimo metodai .....	27
1.3.3. Akustine emisija paremti tyrimo metodai .....	31
1.3.4. Kriterijai asfalto mišinio atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti.....	33
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	36
 2. TEORINIS ALGORITMAS ASFALTO DANGŲ ATSPARUMUI TEMPERATŪRINIAMS PLYŠIAMS VERTINTI IR EKSPERIMENTINIS TYRIMAS JO VALIDACIJAI.....	39
2.1. Teorinis algoritmas vertinti asfalto dangų atsparumą temperatūriniais plyšiams .....	40
2.2. Eksperimentinio tyrimo planas.....	46
2.3. Eksperimentinio tyrimo metodika .....	49
2.3.1. Temperatūrinių plyšių intensyvumo tiriamuosiuose kelių ruožuose nustatymas .....	49
2.3.2. Tiriamuosiuose kelių ruožuose užfiksuotos žemiausios asfalto dangos temperatūros nustatymas .....	49
2.3.3. Gręžtinių asfalto ėminių (kernų) paėmimas .....	50
2.3.4. Bitumo regeneravimas .....	51
2.3.5. Bitumo savybių neigiamose temperatūrose nustatymas.....	52
2.4. Temperatūrinių plyšių intensyvumo tiriamuosiuose kelių ruožuose nustatymo rezultatai .....	58
2.5. Kritinių temperatūrų pasiskirstymo asfalto dangų paviršiuje rezultatai .....	61
2.6. Bitumo savybių tyrimo rezultatai .....	64
2.6.1. Tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos.....	64
2.6.2. Įtempių relaksacijos modulis ir jo kitimo rodiklis.....	67
2.7. Antrojo skyriaus išvados .....	71
 3. BITUMO ĮTEMPIŲ RELAKSACIJOS MODULIU IR JO KITIMO RODIKLIU GRINDŽIAMO ALGORITMO TAIKYMAS ASFALTO DANGŲ ATSPARUMUI TEMPERATŪRINIAMS PLYŠIAMS VERTINTI.....	75
3.1. Bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinės sąlygos temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu.....	76
3.2. Teorinio algoritmo tikslinimas įvertinant eksperimentinio tyrimo rezultatus ...	81
3.3. Algoritmo taikymas bitumo parinkimui atsižvelgiant į žemiausią asfalto dangos temperatūrą .....	83
3.4. Algoritmo taikymo ekonominis efektas .....	87
3.5. Trečiojo skyriaus išvados .....	92
 BENDROSIOS IŠVADOS .....	95

REKOMENDACIJOS .....	97
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	99
AUTORĖS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	111
SUMMARY IN ENGLISH.....	113
PRIEDAI <sup>1</sup> .....	129
A priedas. Tiriamųjų kelių ruožų sąrašas .....	130
B priedas. Temperatūrinių plyšių intensyvumas ir atstumas tarp jų tiriamųjų kelių su asfalto danga ruožuose .....	133
C priedas. Kritinės temperatūros asfalto dangų paviršiuje .....	139
D priedas. Bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymas.....	141
E priedas. Bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio nuokrypių įtakos žemiausiai kritinei temperatūrai analizė .....	144
F priedas. Žemiausios asfalto dangos paviršiaus temperatūros, užfiksuotos kelių oro sąlygų stotelėse 2003–2018 m.....	148
G priedas. Autorės sąžiningumo deklaracija .....	149
H priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo disertacijoje.....	150
I priedas. Mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos .....	166

---

<sup>1</sup> Priedai pateikiami pridėtoje elektroninėje laikmenoje.



---

# Contents

INTRODUCTION .....	1
Problem formulation .....	1
Relevance of the thesis .....	2
Object of the thesis .....	3
Aim of the thesis .....	3
Tasks of the thesis .....	3
Research methodology .....	4
Scientific novelty of the thesis .....	4
Practical value of the research findings .....	4
Defended statements .....	5
Approval of the research findings .....	5
The structure of the thesis .....	6
Acknowledgements .....	6
1. ANALYSIS OF TEST METHODS DEFINING THE FORMATION OF LOW TEMPERATURE CRACKS IN ASPHALT PAVEMENTS .....	7
1.1. Concept of low temperature cracking in asphalt pavements .....	8
1.2. Bitumen test methods and criteria defining low temperature cracking .....	10
1.2.1. Continuum mechanics-based tests .....	11
1.2.2. Fracture mechanics-based tests .....	15
1.2.3. Acoustic emission-based tests .....	17
1.2.4. Criteria to evaluate bitumen resistance to low temperature cracking .....	18

1.3. Asphalt mixtures test methods and criteria defining low temperature cracking.....	23
1.3.1. Continuum mechanics-based tests .....	23
1.3.2. Fracture mechanics-based tests .....	27
1.3.3. Acoustic emission-based tests .....	31
1.3.4. Criteria to evaluate asphalt mixture resistance to low temperature cracking .....	33
1.4. First chapter conclusions, tasks formulation of the thesis .....	36
 2. THEORETICAL ALGORITHM FOR THE EVALUATION OF ASPHALT PAVEMENT RESISTANCE TO LOW TEMPERATURE CRACKING AND EXPERIMENTAL RESEARCH FOR ITS VALIDATION .....	39
2.1. Theoretical algorithm for the evaluation asphalt pavement resistance to low temperature cracking .....	40
2.2. Plan of experimental research .....	46
2.3. Methodology of experimental research .....	49
2.3.1. Determination of low temperature cracking severity in analysed road sections.....	49
2.3.2. Determination of the lowest surface temperature of asphalt pavements recorded in analysed road sections.....	49
2.3.3. Sampling of drilled asphalt (cores) .....	50
2.3.4. Bitumen recovery .....	51
2.3.5. Determination of bitumen properties at low temperatures .....	52
2.4. Results of low temperature cracking severity in analysed road sections .....	58
2.5. Results of critical surface temperature of asphalt pavements .....	61
2.6. Results of bitumen properties .....	64
2.6.1. Linear viscoelastic behaviour range .....	64
2.6.2. Stress relaxation modulus and its slope .....	67
2.7. Second chapter conclusions .....	71
 3. APPLICATION OF THE ALGORITHM BASED ON BITUMEN STRESS RELAXATION MODULUS AND ITS SLOPE PURPOSED FOR EVALUATION OF ASPHALT PAVEMENT RESISTANCE TO LOW TEMPERATURE CRACKING .....	75
3.1. Limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope with regard to the formation and development of low temperature cracks in asphalt pavements .....	76
3.2. Refinement of the theoretical algorithm considering the results of the experimental research .....	81
3.3. Application of algorithm for the selection of bitumen with regard to the lowest surface temperature of the asphalt pavement.....	83
3.4. Economic effect of the application of the algorithm .....	87
3.5. Third chapter conclusions.....	92
 GENERAL CONCLUSIONS .....	95



RECOMENDATIONS .....	97
REFERENCES .....	99
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION .....	111
SUMMARY IN ENGLISH .....	113
ANNEXES <sup>2</sup> .....	129
Annex A. List of analysed road sections .....	130
Annex B. Severity of low temperature cracking and distance between cracks in analysed road sections .....	133
Annex C. Critical surface temperatures of asphalt pavements .....	139
Annex D. Determination of bitumen linear viscoelastic behaviour range .....	141
Annex E. Deviation effect of bitumen stress relaxation modulus and its slope on critical cracking temperature .....	144
Annex F. The lowest surface temperatures of asphalt pavements recorded in road weather stations in 2003–2018 .....	148
Annex G. Declaration of academic integrity .....	149
Annex H. The co-authors' agreements to present publications material in the doctoral dissertation defense .....	150
Annex I. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation .....	166

---

<sup>2</sup>The annexes are supplied in the enclosed compact disc.



---

# Ivadas

## Problemos formulavimas

Asfalto dangų funkcionavimas priklauso nuo bitumo charakteristikų. Netinkamai parinktas bitumas lemia kritinių įtempių asfalto dangoje susidarymą. Būtent dėl jų žiemos laikotarpiu asfalto dangose atsiveria temperatūriniai plyšiai – viena reikšmingiausių asfalto dangų pažeidimų, nulemiančių spartesnę kelio degradaciją.

Asfalto dangose susidarę ir besivystantys temperatūriniai plyšiai lemia dangos lygumo sumažėjimą, o pastarasis eismo nepatogumą, padidėjusias kuro sąnaudas ir spartesnę transporto priemonių nusidėvėjimą. Be to, iškritę krituliai ir susikaupęs vanduo per šiuos plyšius skverbiasi į gilesnius dangos konstrukcijos sluoksnius, o tai lemia dangos konstrukcijos laikomosios gebos sumažėjimą ir ženkliai spartesnę kelio degradaciją. Siekiant užtikrinti dangos konstrukcijos ilgą amžiškumą, būtina asfalto mišinio gamybai parinkti temperatūriniams plyšiams atsparų bitumą. Jei to padaryti nepavyksta susidariusius temperatūrinius plyšius tenka tinkamai taisyti ir prižiūrėti. Temperatūrinių plyšių taisymas ir priežiūra reikalauja specifinių žinių ir specialių technologijų, todėl dažnai šios pažeidos yra sudėtingai valdomos. Dėl netinkamai taisomų ir prižiūrimų temperatūrinių plyšių trumpėja dangos eksploatavimo laikotarpis ir didėja kelių naudotojų ir valdytojų lėšų sąnaudos.

Siekiant efektyviai panaudoti kelių priežiūrai skiriamas lėšas ir užtikrinti asfalto dangų funkcionavimą be temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi, būtina sukurti bitumo parinkimo algoritmą asfalto dangų atsparumui temperatūriniais plyšiams įvertinti.

## Darbo aktualumas

Tvarus, saugus, patogus, ilgaamžis ir transporto priemonių naudotojams patrauklus automobilių kelių tinklas yra kiekvienos išsivysčiusios valstybės tikslas. Tokio tinklo svarba dar labiau išryškėja tranzitinėse valstybėse, kur didžiąją dalį bendrojo vidaus produkto (toliau – BVP) sukuria kelių transportas. Lietuvoje kelių transporto generuojamas BVP per pastaruosius dešimt metų nuolatos auga ir 2018 m. siekė 9 %. Tai yra aukščiausias kelių sektoriaus sukurtas ekonominis rodiklis.

Nuolatos didėjantis krovinių ir žmonių mobilumo poreikis bei nuolat pasireiškiantis kritinių įtempių asfalto dangose viršijimas dėl netinkamai parinkto bituminio rišiklio lemia ženkliai spartesnę automobilių kelių degradaciją, kurios pasekmės itin jaučiamos pastaraisiais metais. Nesiimant atitinkamų priemonių, daugelis kelių palaipsniui taps vartotojams nebepatrauklūs ir tai neigiamai atsilieps šalies ekonomikai. Siekiant ir toliau išlaikyti tokią aukštą kelių transporto sukurtą ekonominę vertę, būtina imtis priemonių, užtikrinančių asfalto dangų funkcionavimą be dangos struktūros pažaidų per numatytą eksploataavimo laikotarpį. Todėl priemonių, vertinančių asfalto dangų atsparumą temperatūriniais plyšiais, kūrimas yra aktuali ir svarbi kelių sektoriaus tyrimų kryptis.

Reikia taip pat pažymėti, kad iki šiol nėra sukurtos visuotinai taikytinos bendros asfalto mišinių ir bituminių rišiklių parinkimo sistemos. Be to, taikant bitumo ir asfalto mišinių tyrimo metodus ir kriterijus, apibrėžiančius temperatūrinių plyšių susidarymą, vis tiek dažnai stebimas temperatūrinių plyšių susidarymas ir vystymasis. Taikomais metodais netiksliai įvertinamą bitumo ir (arba) asfalto mišinio funkcionavimą neigiamose temperatūrose lėmė naujų bitumų, ypač polimerais modifikuotų bitumų, įvedimas į rinką (metodų ir kriterijų kūrimo metu tokie bitumai nebuvo įtraukti į tyrimų programą), ribinių sąlygų nustatymas remiantis kito metodo ribinėmis sąlygomis, o ne faktiniu asfalto dangų funkcionavimu, nepakankamas metodo pakartojamumas ir atkuriamumas, rezultatų priklausomybė nuo bandinio geometrijos, bandiniui aušinti (šaldyti) taikomos terpės, kuria gali būti oras, kalio acetatas arba etanolis ir kt. Todėl būtina algoritmo, įvertinančio asfalto dangų atsparumą temperatūriniais plyšiais, sukūrimui identifikuoti perspektyviausią bitumo arba asfalto mišinio tyrimo metodą ir nustatyti tuo metodu gaunamų savybių ribines sąlygas remiantis faktiniu asfalto dangų funkcionavimu.

## Tyrimų objektas

Šio darbo tyrimų objektas – bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinės sąlygos temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu.

## Darbo tikslas

Šio darbo tikslas nustatyti bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribines sąlygas temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu.

## Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti keliama šie uždaviniai:

1. Sukurti teorinį asfalto dangų atsparumą temperatūriniais plyšiams įvertinantį algoritmą, pagrįstą tiesioginiu bitumo įtempių relaksacijos modulio nustatymu dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens bandiniu.
2. Nustatyti bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribas atliekant bitumo įtempių relaksacijos bandymus neigiamose temperatūrose.
3. Nustatyti temperatūrinių plyšių intensyvumą pasirinktuose automobilių kelių ruožuose ir atlikti iš šių ruožų asfalto viršutinio sluoksnio regeneruoto bitumo bandymus dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens bandiniais atsižvelgiant į tiriamųjų ruožų eksploatacijos laikotarpiu nustatytą žemiausią asfalto dangos paviršiaus temperatūrą.
4. Pateikti sukurto algoritmo taikymo gaires (principus) asfalto dangos viršutinio sluoksnio mišinio gamybai naudotino bitumo parinkimui atsižvelgiant į žemiausią asfalto dangos temperatūrą.
5. Apskaičiuoti bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo taikymo ekonominį efektą lyginant su įprastai taikoma bitumo parinkimo metodika.

## Tyrimų metodika

Darbe taikytas temperatūrinių plyšių intensyvumo automobilių kelių ruožuose ir šių ruožų eksploatacijos metu užfiksuotos žemiausios asfalto dangos paviršiaus temperatūros stebėjimas, laiko-temperatūros superpozicijos principas ir bitumo savybių (tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų, bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio) neigiamoje temperatūroje tyrimo metodai. Taip pat buvo naudojami matematinės statistikos metodai ir sąnaudų ir naudos analizė ekonominio efekto įvertinimui.

## Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji ir reikšmingi rezultatai:

1. Įvertinus automobilių keliuose vyraujančią temperatūrinių plyšių intensyvumą priklausomai nuo asfalto dangos amžiaus, asfalto mišinio ir bitumo rūšies bei atsižvelgiant į žemiausią temperatūrą, užfiksuotą asfalto dangos paviršiuje, nustatytos bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinės sąlygos temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu.
2. Remiantis tyrimų rezultatais sukurtas dinaminis šlyties reometru su 4 mm skersmens bandiniu tiesiogiai nustatomu bitumo įtempių relaksacijos moduliu ir jo kitimo rodikliu grindžiamas algoritmas bitumui asfalto mišinio gamybai parinkti ir tokiu būdu užtikrinti temperatūriniams plyšiams atsparų asfalto dangos funkcionavimą.

## Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurtas bitumo įtempių relaksacijos moduliu ir jo kitimo rodikliu grindžiamas algoritmas vertinti asfalto dangų atsparumą temperatūriniams plyšiams gali būti taikomas praktikoje parenkant bitumą asfalto mišinio gamybai. Tokiu būdu užtikrinamas asfalto dangos funkcionavimas be temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi. Šio algoritmo taikymas lemia apie 40 % mažesnes išlaidas asfalto dangų temperatūrinių plyšių remontui 30 metų laikotarpyje lyginant su įprastai taikoma bitumo parinkimo metodika.

Bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio tiesioginis nustatymas dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens bandiniu neigiamoje tempe-

ratūroje yra ženkliai greitesnis ir ekonomiškesnis lyginant su kitais bitumo ir asfalto mišinių tyrimų metodais, charakterizuojančiais temperatūrinių plyšių susidarymą asfalto dangose. Šio metodo taikymas lemia bitumo elgsenos charakterizavimą visame eksploataciniame temperatūrų diapozone (tiek esant aukštoms, vidutinėms ir žemoms temperatūroms) naudojant vieną prietaisą – dinaminį šlyties reometrą.

## Ginamieji teiginiai

1. Taikant sukurtą bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamą algoritmą galima įvertinti asfalto dangų atsparumą temperatūriniam plyšiams. Šio algoritmo taikymas parenkant bitumą asfalto mišinio gamybai leidžia apriboti temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose.
2. Bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo taikymas parenkant bitumą asfalto dangos mišiniais vietoje įprastai taikomos metodikos temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu yra ekonomiškai naudingas.

## Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinta 13 mokslinių straipsnių: septyni – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę, du – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose *Clarivate Analytics* duomenų bazės „*Conference Proceedings*“ leidiniuose, keturi – kitose tarptautinių konferencijų leidiniuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti šešiose tarptautinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Tarptautinėje konferencijoje „*CETRA 2016: 4<sup>th</sup> international conference on road and rail infrastructures*“ 2016 m. Šibenike;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Transport Research Arena*“ 2016 m. Varšuvoje ir 2018 m. Vienoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“ 2017 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Resilient and Safe Road Infrastructure*“ 2018 m. Kelcuose.

## Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, rekomendacijos, literatūra ir šaltiniai, autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas ir santarauka anglų kalba. Taip pat pabaigoje pateikiami aštuoni priedai.

Darbo apimtis yra 129 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 3 numeruotos formulės, 26 paveikslai ir 11 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudota 126 literatūros šaltiniai.

## Padėka

Disertacijos autorė nuoširdžiai dėkoja moksliniam vadovui prof. dr. Audriui Vaitkui už vertingas mokslines išvalgas, kantrybę ir skirtą laiką mokslinėms diskusijoms disertacijos rengimo metu bei už suteiktas tobulėjimo galimybes mokslinėje ir darbinėje aplinkoje. Autorė taip pat dėkoja dr. Hilde Soenen už perduotą mokslinę patirtį, žinias ir vertingas mokslines konsultacijas stažuotės Antverpeno universitete (Antverpenas, Belgija) metu. Autorė reiškia padėką disertacijos ekspertams už vertingas pastabas ir komentarus. Už visokeriopą palaikymą ir pagalbą doktorantūros studijų metu autorė dėkinga VGTU Kelių tyrimo instituto ir Automobilių kelių mokslo laboratorijos kolegoms. Autorė taip pat dėkinga Lietuvos mokslo tarybai už skirtą finansinę paramą. Ne mažiau dėkinga šeimai už begalinę kantrybę, visokeriopą palaikymą ir supratimą.



---

## Temperatūrinių plyšių susidarymą asfalto dangose apibrėžiančių metodų analizė

Šiame skyriuje pateikiama temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose samprata. Analizuojami ir apibendrinami pasaulyje dažniausiai taikomi kontinuumo mechanika, irimo mechanika ir akustine emisija paremti bitumo ir asfalto mišinių tyrimo metodai ir kriterijai, apibrėžiantys temperatūrinių plyšių susidarymą asfalto dangose. Išskiriami jų privalumai ir trūkumai.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta dvylikoje autorės mokslinių publikacijų: Vaitkus *et al.* (2016a); Vaitkus *et al.* (2016b); Vaitkus *et al.* (2016c); Gražulytė *et al.* (2016); Gražulytė *et al.* (2017); Gražulytė, Vaitkus (2017); Vaitkus *et al.* (2017a); Vaitkus *et al.* (2017b); Vaitkus *et al.* (2018a); Vaitkus *et al.* (2018b); Vaitkus *et al.* (2018c); Vaitkus *et al.* (2019).

## 1.1. Temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose samprata

Temperatūriniai plyšiai – tai dažniausiai statmenai (tačiau gali būti ir įstrižai) kelio ašiai susidarę dangos trūkiai (minimalus plyšio ilgis 0,15 m, plotis – 1 mm), kurie dažnai išsidėsto vienodu atstumu vienas nuo kito. Temperatūrinių plyšių identifikavimas siejamas su plyšio padėties nustatymu ir kitų galimų plyšio susidarymo priežasčių atmetimu (pavyzdžiui, neteisingas skersinės siūlės įrengimas, atsikartojantis plyšys ir kt). Atsižvelgiant į temperatūrinių plyšių susidarymo priežastis jie skirstomi į du tipus (Shahin, McCullough 1972):

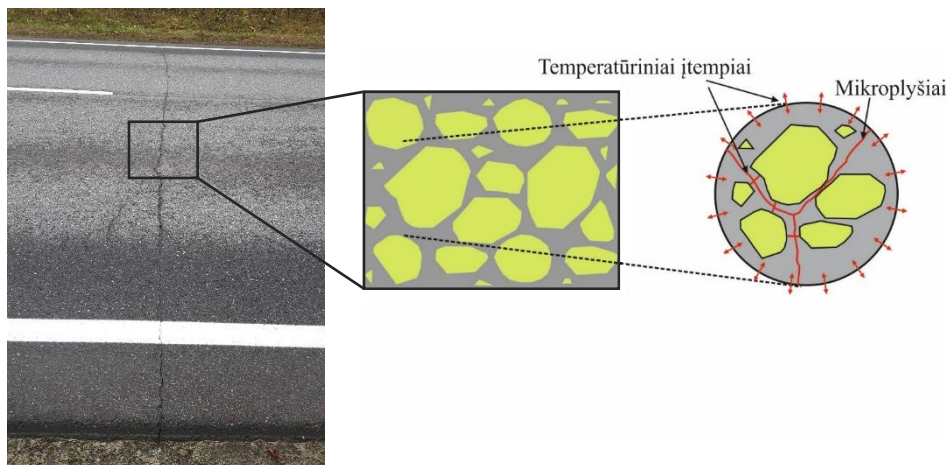
- temperatūriniai plyšiai, kurie atsiveria dėl vienkartinio kritinės (neigiamos) temperatūros poveikio;
- temperatūriniai nuovargio plyšiai, kurie atsiveria dėl pasikartojančio didelio dangos paviršiaus aukščiausios ir žemiausios temperatūros skirtumo.

Pirmuoju atveju asfalto dangą veikiant pakankamai žema (kritinė) temperatūra, joje sukeliami temperatūriniai įtempiai, viršijantys asfalto mišinio tempiamąjį stiprį. Dėl šios priežasties dangoje atsiranda trūkis – temperatūrinis plyšys. Tokio pobūdžio temperatūrinių plyšių susidarymui pakanka vienkartinio neigiamos (kritinės) temperatūros poveikio. Vadinasi, egzistuoja tam tikra temperatūros riba, kuri apsprendžia asfalto mišinio atsparumą temperatūriniams plyšiams. Asfalto dangos eksploatacijos metu neviršijus šios temperatūros asfalto dangoje nesusiformuoja temperatūriniai plyšiai. Ši temperatūra vadinama žemiausia kritine temperatūra. Bitumo ir asfalto mišinių tyrimo metodai, apibrėžiantys temperatūrinių plyšių susidarymą, yra orientuoti būtent į šios temperatūros nustatymą.

Antruoju atveju asfalto dangą cikliška veikiant tai aukšta, tai žema temperatūra, joje sukeliami įtempiai yra ženkliai mažesni nei asfalto mišinio tempiamasis stipris. Tačiau šiuos įtempius asfalto mišinys palaipsniui akumuliuoja ir bėgant laikui jie gali viršyti asfalto mišinio tempiamąjį stiprį, o tai lemia temperatūrinio plyšio atsivėrimą. Kadangi temperatūrinių nuovargio plyšių susidarymo ir vystymosi koncepcija yra itin sudėtinga ir kompleksiška, tai jų susidarymo imitacija laboratorijoje yra komplikauta ir praktiškai netyrinėjama. Todėl toliau šioje disertacijoje bus kalbama tik apie temperatūrinius plyšius, susidarancius dėl vienkartinio neigiamos temperatūros poveikio.

Temperatūriniai įtempiai asfalto dangoje susidaro dėl ribojamo (varžomo) asfalto mišinio traukimosi, skirtingo asfalto mišinio sudedamųjų medžiagų traukimosi ir bitumo savybių kitimo kintant temperatūrai. Nustatyta, kad neigiamose temperatūrose bitumas traukiasi apie 10 kartų daugiau nei užpildo dalelės, todėl aplink jas mažėja bitumo plėvelės storis ir taip asfalto mišinyje sukeliami temperatūriniai įtempiai. Tuo pačiu metu, dėl žemėjančios temperatūros keičiasi bitumo elgsena, t. y. bitumas iš tampriai-klampios būsenos pereina į trapią, ir tampa vis

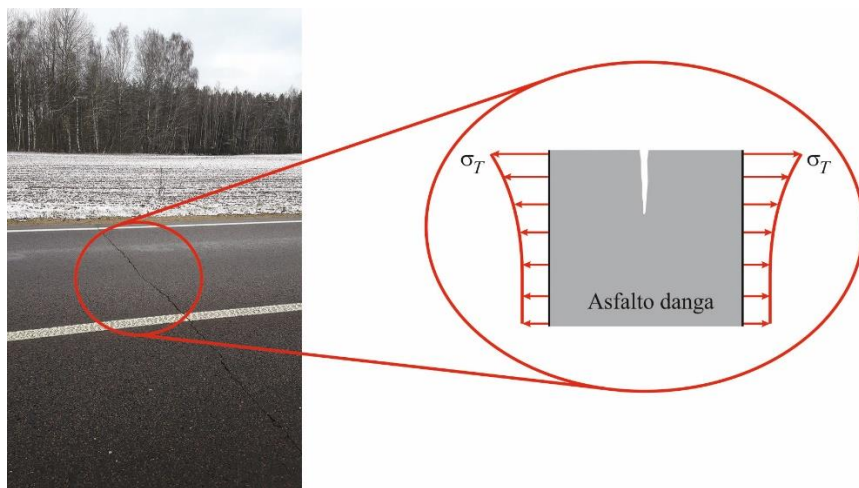
mažiau atsparus irimui (tempimui), kas ir lemia temperatūrinių plyšių susidarymą (Boutin, Lupien 2000). Temperatūrinių įtempių asfalto mišinyje susidarymo schema pateikta 1.1 paveiksle.



**1.1 pav.** Temperatūrinių įtempių asfalto mišinyje susidarymo schema  
**Fig. 1.1.** Scheme of thermally induced tensile stresses in asphalt mixture

Visais atvejais temperatūriniai įtempiai asfalto dangoje pasiskirsto netolygiai. Didžiausi (kritiniai) įtempiai susidaro asfalto dangos paviršiuje, nes būtent čia yra žemiausia asfalto dangos temperatūra ir didžiausias aukščiausios ir žemiausios temperatūros skirtumas, o mažiausi – asfalto dangos apačioje. Todėl temperatūriniai plyšiai pradeda formuotis asfalto dangos paviršiuje ir palaipsniui skverbiasi gilyn į dangą (1.2 pav.). Toks temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi mechanizmas vadinamas „iš viršaus į apačią“ (Shahin, McCullough 1972; Haas *et al.* 1987; Roque *et al.* 1993).

Temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi mechanizmą „iš viršaus į apačią“ patvirtina Kanadoje atliktas tyrimas. Šiame tyrime skirtinguose asfalto dangos sluoksniuose buvo išdėliota viela, kuria buvo leidžiama elektra ir registruojamas laikas, kuomet kiekviena viela yra nutraukiama besivystančio temperatūrinio plyšio. Tyrimo metu nutraukta pirmoji viela buvo arčiausiai dangos paviršiaus, o laikotarpis tarp pirmosios ir paskutiniosios vielos nutraukimo buvo mažesnis nei 2 min (Boutin, Lupien 2000). Vadinasi, temperatūriniai plyšiai asfalto dangoje vystosi akimirksniu.



**1.2 pav.** Temperatūrinių plyšių atsivėrimo ir vystymosi principinė schema  
**Fig. 1.2.** Principal scheme of formation and propagation of low temperature crack

Temperatūrinių plyšių atsivėrimą ir vystymąsi asfalto dangose lemia šie pagrindiniai veiksniai (Kim 2009):

- medžiagų šiluminis traukimosi koeficientas;
- asfalto dangos sluoksnių sukibimas su pagrindo sluoksniu;
- aplinkos temperatūra ir jos pokytis;
- medžiagų įtempių relaksacija;
- medžiagų standis.

Šių veiksnių kontroliavimas leidžia valdyti temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose. Tačiau ne visi veiksniai gali būti kontroliuojami (pvz. aplinkos temperatūra ir jos pokytis). Todėl siekiant išvengti temperatūrinių plyšių susidarymo, būtina parenkant bitumą asfalto mišinio gamybai jį ištirti neigiamose temperatūrose ir įvertinti jo funkcionavimą asfalto dangų atsparumo temperatūriniais plyšiams atžvilgiu. Taip pat atsparumas temperatūriniais plyšiams gali būti tiriamas analizuojant asfalto mišinio funkcionavimą neigiamose temperatūrose.

## 1.2. Bitumo tyrimo metodai ir kriterijai, apibrėžiantys temperatūrinių plyšių susidarymą

Bitumo tyrimo metodai, apibrėžiantys temperatūrinių plyšių susidarymą, pagal tyrimo metodikos principus skirstomi į:

- kontinuumo mechanika paremtus tyrimus;

- irimo mechanika paremtus tyrimus;
- akustine emisija paremtus tyrimus.

Kontinuumo mechanika paremti bitumo tyrimo metodai yra praktikoje labiausiai taikomi ir geriausiai įsisavinti tyrimo metodai. Jų išskirtinumas, jog bandymui atlikti taikomas tolydusis bandinys, t. y. suformuojamas bandinys be pradinio plyšio (įpjovos). Tačiau šio tipo tyrimo metodų, įtrauktų į bitumo eksploatacinių charakteristikų reikalavimus (PG) atsparumui temperatūriniam plyšiams vertinti, taikymas dažnai neapsaugo asfalto dangų nuo temperatūrinių plyšių susidarymo, ypač tiriant modifikuotus bitumus (Hesp 2004; Iliuta *et al.* 2004; Hesp *et al.* 2009a, 2009b). Tai lėmė nauju požiūriu – irimo mechanika – paremtų tyrimo metodų vystymąsi (Hoare, Hesp 2000; Anderson *et al.* 2001; Kim *et al.* 2006). Pastaraisiais metais taip pat vystomi akustine emisija paremti eksperimentiniai bitumo tyrimo metodai (Apeagyei *et al.* 2009).

Visi bitumo tyrimo metodai, apibrėžiantys temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose, nepriklausomai nuo metodikos principų yra orientuoti į žemiausios kritinės temperatūros nustatymą.

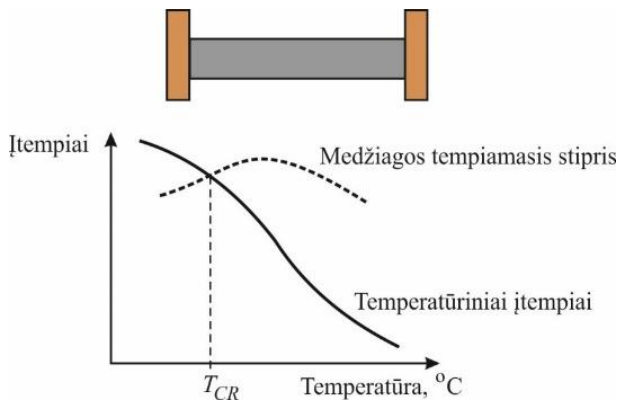
### 1.2.1. Kontinuumo mechanika paremti tyrimo metodai

Kontinuumo mechanika paremtuose tyrimo metoduose daroma prielaida, kad temperatūriniai plyšiai susiformuoja tuomet, kai medžiagos įtempiai, atsiradę dėl temperatūros poveikio, yra didesni nei tos medžiagos tempiamasis stipris (1.3 pav.). Atkreiptinas dėmesys, kad šiuose tyrimo metoduose taikomi bandiniai be pradinės įpjovos. Kelių tiesyboje egzistuoja šie kontinuumo mechanika paremti bitumo tyrimo metodai:

- Fraso tyrimo metodas (angl. *Fraass test*);
- bandymai lenkiamo strypelio reometru (angl. *tests with bending beam rheometer (BBR)*);
- bandymai grynojo tempimo prietaisu (angl. *direct tension (DT) tests*);
- išplėstiniai bandymai lenkiamo strypelio reometru (angl. *extended bending beam rheometer (ExBBR) tests*);
- bandymai bitumo plyšio formavimosi prietaisu (angl. *asphalt binder cracking device (ABCD) tests*);
- bandymai dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens plokštelėmis (angl. *dynamic shear rheometer with 4 mm parallel plates (4-mm DSR) tests*).

Fraso tyrimo metodas yra vienas iš seniausių tyrimų metodų bitumo funkcionavimui neigiamose temperatūrose charakterizuoti. Jį sukūrė A. Frasas 1937 m. Tyrimo metu plieninė plokštelė, padengta 0,5 mm storio bitumo sluoksniu, aplinkos temperatūrai kintant 1 °C/min greičiu kas kiekvienu laipsniu akimirksniui su-

lenkiama ir vėl grąžinama į pradinę padėtį. Temperatūra, kuriai esant bitume susiformuoja plyšys vadinama trapumo temperatūra pagal Frasą. Daugelis mokslininkų abejoja šio bandymo tinkamumu vertinti bitumo atsparumą temperatūriniais plyšiams, nes bandymo metu bandinys yra periodiškai veikiamas apkrova, o tai primena nuovargio bandymo imitavimą. Be to, dažnai šiuo metodu asfalto mišinio gamybai parinktas bitumas asfalto dangos eksploatavimo metu neigiamose temperatūroje pradeda plyšti ir lemia temperatūrinių plyšių susidarymą. Tai ypač dažnai pastebima tiriant polimerais modifikuotus bitumus (Jellema *et al.* 2012; Radziszewski *et al.* 2014).



**1.3 pav.** Kontinuumo mechanika paremtų tyrimo metodų koncepcija (Velasquez, Bahia 2013)

**Fig. 1.3.** Concept of continuum-based test methods to address low temperature cracking (Velasquez, Bahia 2013)

BBR ir DT bandymai taikant bandinius be pradinės įpjovos sukurti Jungtinėse Amerikos Valstijose vykdant Strateginę kelių tyrimo programą (angl. *Strategic Highway Research Program (SHRP)*) ir yra įtraukti į bitumo eksploatacinių charakteristikų reikalavimus (PG) atsparumui temperatūriniams plyšiams vertinti (Petersen *et al.* 1994). BBR bandymo principas yra paremtas elementariaja lenkimo teorija darant prielaidą, kad bandinys apkrovimo metu yra tiesiškai tampriai klampiamame būvyje. Bandymo metu nustatomas lenkimo standis ir jo kitimo rodiklis. Lenkimo standžio skaičiavimuose šlyties deformacijos nevertinamos, nes santykis tarp bandinio aukščio ir atstumo tarp atramų, ant kurių padedamas bandinys yra mažesnis nei 16. Bandymo metu suformuota 127 mm ilgio, 12,7 mm pločio ir 6,4 mm aukščio bitumo sijelė dedama ant dviejų atramų, viena nuo kitos nutolusių 101,6 mm, ir 240 s ties bandinio viduriu veikiamą pastovia 980 mN gniuždančiąja apkrova. BBR bandymai atliekami taikant laiko-temperatūros superpozicijos principą, pagal kurį medžiagos standis praėjus 60 s nuo apkrovimo pradžios esant  $T$  °C

temperatūrai yra apytiksliai lygus medžiagos standžiui praėjus 2 val. nuo apkrovimo pradžios esant ( $T - 10$ ) °C temperatūrai (Anderson, Kennedy 1993).

Tačiau šis tyrimo metodas turi trūkumų. Pirma, bitumo fizinis kietėjimas turi reikšmingą įtaką bandymo rezultatams (Lu, Isacsson 2000; Marasteanu *et al.* 2004). Antra, lenkimo standžio ir jo kitimo rodiklio kriterijai vertinti bitumo atsparumą temperatūriniam plyšiams nustatyti tiriant tik nemodifikuotus bitumus. Todėl analizuojant modifikuotus bitumus dažnai šių kriterijų taikymas neužtikrina asfalto dangų funkcionavimo be temperatūrinių plyšių (Dongré *et al.* 1997; Kluttz, Dongré 1997; Bouldin *et al.* 1999). Be to, kai kurie tyrimai parodė, kad iki šiol teigiamai vertinta aukšta lenkimo standžio kitimo rodiklio vertė yra diskutuotina, nes bitumuose, pasižyminčiuose mažesne lenkimo standžio kitimo rodiklio verte, kai kuriais atvejais lėčiau vystosi temperatūriniai įtempiai, o tai pageidautina bitumo savybė temperatūrinių plyšių susidarymo prevencijos atžvilgiu (Marasteanu 2004; Marasteanu and Basu 2004).

DT bandymams atlikti taikomi „kaulo“ formos bandiniai, kurie tempiami pastoviu 1 mm/min greičiu tol, kol bandinys suyra (nutrūksta). Šis bandymas taikytinas tik esant mažoms deformacijoms, t. y. kai bandymo metu bandinys nedeformuojamas daugiau kaip 10 %. Jei bitumas yra plastiškas (tašus) ir bandymo metu išsitempia daugiau kaip 10 %, tai bandinio suirimo deformacija priimama lygi 10 % (Anderson, Dongre 1995). DT bandymo rezultatai (suirimo deformacija ir įtempiai) priklauso nuo bandymo metu bandiniui aušinti (šaldyti) taikomos terpės, kuria gali būti oras, kalio acetatas arba etanolis. Nustatyta, kad bitumo tempiamasis stipris, kuomet bandinio aušinimui (šaldymui) naudojamas etanolis, yra nuo trijų iki penkių kartų mažesnis nei taikant kalio acetatą ar orą (Dongré, D'Angelo 1998).

Nuo 2002 m. Amerikos kelių ir transporto asociacijos (angl. *American Association of State Highway and Transportation Officials*) standartuose yra įtrauktas temperatūrinių įtempių skaičiavimo modelis. Šiuo modeliu su BBR prie skirtingų temperatūrų nustatytas bitumo lenkimo standis perskaičiuojamas į temperatūrinius įtempius, kurie lyginami su bitumo suirimo įtempiais, nustatytais DT bandymu. Tokiu būdu nustatoma žemiausia kritinė temperatūra, kurią viršijus asfalto dangoje susiformuoja temperatūriniai plyšiai. Šį atsparumo temperatūriniam plyšiams vertinimo metodą sukūrė Bouldin *et al.* 2000 m., tačiau jis taip pat kaip ir BBR ir DT bandymai dažnai netinkamai charakterizuoja bitumo funkcionavimą (Shenoy 2002).

A. Shenoy pasiūlė paprastesnį metodą kaip nustatyti žemiausią kritinę temperatūrą analizuojant tik temperatūrinius įtempius, apskaičiuotus remiantis bitumo lenkimo standžiu, nustatytu BBR bandymu prie skirtingų temperatūrų, t. y. netaikant DT bandymu nustatytų bitumo suirimo įtempių. Šiuo atveju šalia temperatūrinių įtempių kreivės šakų brėžiama viena arba dvi asimptotės. Jei brėžiama viena asimptotė šalia didesnių temperatūrinių įtempių kreivės šakos, tai žemiausia

kritine temperatūra priimama temperatūra, kurią asimptotė kerta ties  $x$  ašimi. Priešingu atveju, t. y. jei brėžiamos dvi asimptotės, žemiausia kritine temperatūra laikoma ta temperatūra, ties kuria susikerta abi asimptotės. Palyginus Bouldin *et al.* (2000) ir A. Shenoy (2002) pasiūlytais metodais gaunamus rezultatus nustatyta stipri koreliacija ( $R^2 = 0,9$ ). Tačiau A. Shenoy (2002) pasiūlytas bitumo atsparumo temperatūriniais plyšiams vertinimas tiksliau charakterizuoja bitumo elgseną nei Bouldin *et al.* (2000) metodas ir yra mažiau jautrus bitumo fiziniui kietėjimui (Shenoy 2002; Marasteanu *et al.* 2004).

Fizinio kietėjimo įtaka bitumo atsparumui temperatūriniais plyšiams įvertinama atliekant ExBBR bandymą. Bandymo principas yra analogiškas anksčiau aptartam BBR bandymui, tačiau šiuo atveju prieš atliekant bandymą bandiniai ženkliai ilgiau (1 val., 24 val. ir 72 val.) laikomi tam tikroje neigiamoje temperatūroje. Mokslininkai nustatė, kad asfalto mišiniai, kurių gamybai buvo naudoti bitumai, pasižymintys nedideliu žemiausios kritinės temperatūros padidėjimu dėl fizinio kietėjimo, jų eksploatavimo metu nebuvo jautrūs temperatūrinių plyšių susidarymui. Tuo tarpu asfalto mišiniuose, kurių gamybai buvo naudoti bitumai, pasižymintys dideliu žemiausios kritinės temperatūros padidėjimu, pasireiškė temperatūriniai plyšiai. Šis bitumo tyrimo metodas tiksliau charakterizuoja bitumo elgseną neigiamose temperatūrose nei BBR ir DT bandymai (Hesp, Subramani 2009; Hesp *et al.* 2009a, 2009b).

ABCD bandyme matuojami apie 50,8 mm skersmens invarinį žiedą, kurio temperatūrinis traukimosi koeficientas yra tik  $1,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ , suformuoto žiedo formos bitumo bandinio temperatūriniai įtempiai. Žemiausia kritine temperatūra laikoma temperatūra, kuriai esant bandinyje susidaro plyšys, t. y. stebimas deformacijų šuolis (Kim 2005; Kim *et al.* 2006). Šio tyrimo metodo kūrėjai teigia, kad egzistuoja stipri koreliacija tarp šio metodo rezultatų ir PG reikalavimų. Tačiau analizuojant žemiausių kritinių temperatūrų, nustatytų ABCD bandymu ir BBR bandymais taikant bandinius su pradine įpjova ir be jos, priklausomybę, nustatyta silpna koreliacija (Velasquez *et al.* 2011; Marasteanu *et al.* 2012a). Taip pat nėra žinoma, kuris iš šių metodų geriausiai charakterizuoja bitumo elgseną neigiamose temperatūrose.

Sui *et al.* (2010, 2011) pasiūlė bitumo atsparumą temperatūriniais plyšiams vertinti atliekant 4-mm DSR bandymus. Šio metodo kūrėjai nustatė, kad bitumo įtempių relaksacijos modulis, apskaičiuojamas remiantis 4-mm DSR bandymų rezultatais, puikiai koreliuoja su lenkimo standžiu, nustatytu BBR bandymais. 4-mm DSR bandymo privalumas, kad bandiniui suformuoti reikia tik 25 mg bitumo, kai tuo tarpu atliekant BBR bandymus vienam bandiniui pagaminti reikia ne mažiau kaip 15 g. bitumo. Tai ypač svarbu tiriant bitumą, regeneruotą iš eksploatuojamų kelių ruožų, nes ženkliai sumažėja bandymui atlikti reikalingas gręžtinių ėminių skaičius, o tai itin pageidautina, nes bet kokia intervencija į asfalto dangą spartina dangos degradaciją. Be to, 4-mm DSR taikymas leidžia visapusišką, t. y. esant aukštai, vidutiniškai ir žemai aplinkos temperatūrai, bitumo elgsenos charakterizavimą



naudojant vieną prietaisą – dinaminį šlyties reometrą. 4-mm DSR bandymas taikytinas tiek modifikuotams, tiek ir nemodifikuotams bitumams tirti. Taip pat gali būti taikomas laiko-temperatūros superpozicijos principas, apie kurį plačiau aptarta kalbant apie BBR bandymus. Atkreiptinas dėmesys, kad bitumo fizinio kietėjimo įtaka gaunamiems rezultatams pastebėta tik pirmomis dvejomis bandymo atlikimo valandomis, po kurių ženkliai sumažėjo arba visiškai išnyko (Farrar *et al.* 2015).

### 1.2.2. Irimo mechanika paremti tyrimo metodai

Esami bitumo eksploatacinių charakteristikų reikalavimų (PG) metodai (BBR ir DT bandymai, kuomet taikomi bandiniai be pradinės įpjovos) neužtikrina asfalto dangų funkcionavimo be temperatūrinių plyšių susidarymo, ypač jei asfalto mišinio gamybai taikomas modifikuotas bitumas (Hesp 2004; Iliuta *et al.* 2004; Hesp *et al.* 2009a, 2009b). Todėl atsirado poreikis ieškoti naujų, geresnių bitumo funkcionavimą neigiamose temperatūrose charakterizuojančių tyrimo metodų. Irimo mechanika paremtų bitumo tyrimo metodų vystymas pasirodė tinkama tyrimų kryptis siekiant užtikrinti asfalto dangų funkcionavimą be temperatūrinių plyšių. Šie tyrimų metodai taikytini tiek nemodifikuotiems, tiek ir modifikuotiems bitumams. Pabrėžtina, kad irimo mechanika paremtais tyrimo metodais tiriant modifikuotus bitumus identifikuojama bitumų modifikavimui taikytų priedų įtaka bitumo funkcionavimui (Hoare, Hesp 2000; Roy, Hesp 2001; Andriescu *et al.* 2004).

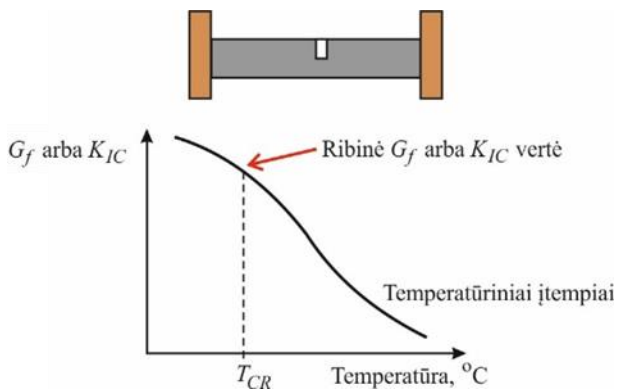
Irimo mechanika paremtuose bitumų tyrimo metoduose naudojami įpjauti bandiniai. Ši įpjova imituoja temperatūrinio plyšio atsivėrimą ir lemia tolimesnę medžiagos elgseną, t. y. didžiausi įtempiai susidaro ties įpjovos (plyšio) viršūne ir bandinio irimas (plyšio formavimasis) vyksta pradinės įpjovos (plyšio) plokštumoje. Žemiausia kritinė temperatūra, nustatyta taikant bandinius be pradinės įpjovos gali būti net 10 °C žemesnė nei temperatūra, gauta taikant įpjautus bandinius (Ponniah, Hesp 1996; Iliuta *et al.* 2004). Vadinasi, irimo mechanika paremti tyrimų metodai lemia griežtesnius reikalavimus bitumams ir mažesnį temperatūrinių plyšių susidarymą asfalto dangose.

Irimo mechanika paremtuose tyrimų metoduose daroma prielaida, kad temperatūriniai plyšiai susiformuoja tuomet, kai pasiekiamas tam tikra kritinė medžiagos irimo rodiklio (pvz. irimo energijos, įtempių intensyvumo koeficiento, efektyviojo darbo, plastiškojo darbo) vertė (1.4 pav.). Medžiagos elgsena irimo mechanika paremtuose bitumų tyrimuose charakterizuojama taikant tiesiškai tamprios irimo mechanikos (angl. *linear elastic fracture mechanics (LEFM)*) arba tampriai plastinės (netiesinės) irimo mechanikos dėsnius (angl. *elastic plastic fracture mechanics (EPFM)*). Bitumo fizinio kietėjimo įtaka žemiausiai kritinei temperatūrai gali būti įvertinama nustatant žemiausios kritinės temperatūros po-

kyti, t. y. atliekant irimo mechanika paremtus bitumų tyrimus ir nustatant žemiausią kritinę temperatūrą iš karto suformavus bandinį ir suformuotą bandinį tam tikrą laiko tarpą išlaikius tam tikromis sąlygomis.

Kelių tiesyboje yra šie irimo mechanika paremti bitumo tyrimo metodai:

- bandymai lenkiamo strypelio reometru taikant ties bandinio (sijelės) viduriu iš apačios link viršaus įpjautus bandinius (angl. *single-edge notched bending (SENB) tests*);
- bandymai grynojo tempimo prietaisu (DT) taikant ties bandinio viduriu skersine kryptimi nuo abiejų kraštų link vidurio įpjautus bandinius (angl. *double-edge notched tests (DENT)*).



**1.4 pav.** Irimo mechanika paremtų tyrimo metodų koncepcija (Velasquez, Bahia 2013)

**Fig. 1.4.** Concept of fracture mechanics-based test methods to address low temperature cracking (Velasquez, Bahia 2013)

SENB bandymu imituojamas bitumo trapusis irimas, t. y. kai aplink plyšį susidaro tamprus įtempių laukas ir plyšio viršūnėje nėra plastinių zonų, kurį apibūdina irimo energija  $G_f$  ir įtempių intensyvumo koeficientas  $K_{Ic}$  (Lee, Hesp 1994; Hesp 2004; Iliuta *et al.* 2004). Pirmaisiais šio metodo taikymo atvejais bandyta sumažinti bandinio gamybai reikalingą bitumo kiekį. Todėl vietoje standartinio bituminio bandinio (sijelės) buvo gaminamas ženkliai trumpesnis bituminis bandinys, likusią bandinio dalį kompensuojant dviem metalinėmis sijelėmis, kurios buvo tvirtinamos prie bituminio bandinio kraštų (Hoare, Hesp 2000; Hesp 2003). Tačiau atliekant bandymus pastebėta, kad dažnai pažeidžiama adhezija tarp bituminio bandinio ir metalinės sijelės. Todėl Velasquez *et al.* (2011) pasiūlė šiam bandymui taikyti įprastai BBR bandymams formuojamas sijeles jų viduryje iš apačios į viršų suformuojant įpjovą. Analizuojant šiuo metodu atliktų tyrimų rezultatus pastebėtas stiprus ryšys tarp bandinio įlinkio veikiant jį di-

džiausia apkrova, kuri fiksuojama prieš pat jam suyrant, ir asfalto dangoje pasireiškiančių temperatūrinių plyšių intensyvumo. Todėl šis parametras pasiūlytas kaip dar vienas kriterijus vertinti bitumo atsparumą temperatūriniams plyšiams (Velasquez *et al.* 2011; Bahia *et al.* 2012).

Bitumo funkcionavimas tampa ir plastinės (netiesinės) irimo mechanikos dėsniais charakterizuojamas nustatant efektyvųjį darbą  $w_e$  (darbą, kuris atliekamas medžiagos irimo metu), plastiškąjį darbą  $w_p$  (darbą, kuris atliekamas plyšio viršūnėje esančiose plastinėse zonose) ir apytikslį plyšio viršūnės atsivėrimą. Šios charakteristikos nustatomos atliekant DENT bandymą (Andriescu *et al.* 2004; Ou Zhao, Hesp 2006; Andriescu, Hesp 2009). Pabrėžtina, kad šiuo bandymo metodu apytikslis plyšio viršūnės atsivėrimas nėra tiesiogiai išmatuojamas. Hesp *et al.* (2009a) nustatė, kad bitumai, regeneruoti iš kelių ruožų, kuriuose nepasireiškia temperatūriniai plyšiai arba jų intensyvumas minimalus, yra tāsūs.

DENT bandymu gali būti nustatomas ir įtempio intensyvumo koeficientas, grindžiamas tiesiškai tamprios irimo mechanikos dėsniais (Li *et al.* 2006; Zofka, Marasteanu 2007). Zofka ir Marasteanu (2007) nustatė, kad šiuo metodu nustatyti irimo metu susidarę įtempiai ir deformacijos yra apytiksliai 3 kartus mažesni nei atliekant DT bandymus, kurių metu taikomi bandiniai be pradinės įpjovos.

### 1.2.3. Akustine emisija paremti tyrimo metodai

Akustine emisija paremti tyrimo metodai grindžiami staigiu energijos išskyrimu plyšio atsivėrimo metu. Ši energija per medžiagą nuo plyšio susidarymo vietos sklinda mechaninėmis bangomis, kurios registruojamos specialiais ant medžiagos paviršiaus pritvirtintais davikliais (Maji *et al.* 1990). Toks tyrimo metodas leidžia identifikuoti net mikro plyšių atsivėrimą. Temperatūra, kuriai esant įvyksta akustinė emisija, t. y. susidaro plyšys, vadinama žemiausia kritine temperatūra. Tik vienas bitumo tyrimo metodas yra paremtas akustine emisija. Šio metodo bandymo procedūra aprašyta Apeagyei *et al.* (2009) ir Buttlar *et al.* (2011) straipsniuose. Pabrėžtina, kad bandymo atlikimui taikomas analogiškas tolydus (be įpjovos) bandinys (sijelė) kaip ir BBR bandymams atlikti.

Atlikti bitumo tyrimo metodų palyginamieji tyrimai rodo, kad akustine emisija paremti tyrimų metodai geriau charakterizuoja bitumo funkcionavimą neigiamose temperatūrose nei BBR ir DT bandymais nustatytos charakteristikos taikant bandinius be pradinės įpjovos. Penkiems JAV tiriamųjų bandomųjų eksperimentinių ruožų regeneruotiems bitumams nustatyta žemiausia kritinė temperatūra remiantis akustine emisija buvo aukštesnė nei gauta vadovaujantis PG reikalavimų metodais. Be to, šiuose ruožuose nustatytas temperatūrinių plyšių intensyvumas buvo proporcingas minėtų skirtingais metodais nustatytų žemiausių kritinių temperatūrų skirtumui: kuo ruože didesnis temperatūrinių plyšių intensyvumas, tuo

didesnis tam ruožui įrengti taikyto bitumo žemiausių kritinių temperatūrų skirtumas (Behnia *et al.* 2016).

#### 1.2.4. Kriterijai bitumo atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti

Mokslininkai nuolatos vysto ir tobulina esamus bei ieško naujų kriterijų bitumo atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti. Pirmieji tokio pobūdžio bandymai siejami su Fraso tyrimo metodu, penetracija esant 25 °C temperatūrai, minkštėjimo temperatūra ir kinematinė klampa esant 135 °C temperatūrai. Manyta, kad penetracijos indeksas, kurį apsprendžia penetracija esant 25 °C ir minkštėjimo temperatūra, parodo bitumo jautrumą temperatūriniais plyšiams. Siekiant apriboti temperatūrinių plyšių susidarymą asfalto dangose bitumo penetracijos rodiklis turėjo būti didesnis nei –1,5. McLedo bedimensinis penetracijos-klampos skaičius taip pat taikytas kaip kriterijus vertinti bitumo atsparumą temperatūriniais plyšiams. Šiuo atveju jis turėjo būti didesnis nei –0,6. Esant mažesniai už –0,6, bet didesniai nei –1,0, bitumas buvo laikomas vidutiniškai jautriu temperatūrinių plyšių susidarymui (Robertson 1987).

Įgyvendinus tyrimą pagal Jungtinių Amerikos Valstijų Strateginę kelių tyrimo programą sukurti du tyrimo metodai (BBR ir DT bandymai, kuomet taikomi bandiniai be pradinės įpjovos) ir apibrėžti kriterijai vertinti bitumo atsparumą temperatūriniais plyšiams. BBR bandymas atliekamas esant 10 °C aukštesnei temperatūrai nei žemiausia dangos paviršiaus temperatūra. Reikalaujama, kad esant šiai bandymo temperatūrai (Anderson, Kennedy 1993):

- lenkimo standis po 60 s būtų ne didesnis kaip 300 MPa;
- lenkimo standžio kitimo rodiklis po 60 s būtų ne mažesnis kaip 0,3.

Šie kriterijai yra įtraukti į bitumo eksploatacinių charakteristikų reikalavimus (PG) atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti.

Lenkimo standžio po 60 s kriterijus yra paremtas Readshaw (1972) tyrimu, kuris parodė, kad bitumas, pasižymintis mažesniu nei 200 MPa standžiu, nustatytu praėjus 2 val. nuo bandinio apkrovimo pradžios esant žemiausiai dangos temperatūrai, yra atsparus temperatūrinių plyšių susidarymui. Mokslininkų grupė vykdydama SHRP tyrimą Nr. A-005A pritaikė laiko-temperatūros superpozicijos principą ir Readshaw (1972) nustatytą ribinę vertę pakėlė iki 300 MPa (Lytton *et al.* 1993).

Lenkimo standžio kitimo rodiklio po 60 s kriterijus yra pagrįstas nuostata, kad didelė lenkimo standžio kitimo rodiklio vertė lemia greitesnę temperatūrinių įtempių relaksaciją, o tai pageidautina savybė atsparumo temperatūriniais plyšiams atžvilgiu. Mokslininkų grupė vykdydama SHRP tyrimą Nr. A-002A pasiūlė reikalaujamą lenkimo standžio kitimo rodiklio vertę (0,35). Tačiau vykdant SHRP tyrimą Nr. A-005A buvo palyginta anksčiau pasiūlyta bitumo lenkimo standžio kitimo rodiklio vertė su faktiniu dangos konstrukcijos funkcionavimu ir nustatyta,

kad užtikrini asfalto dangos funkcionavimą be temperatūrinių plyšių pakanka mažesnės lenkimo standžio kitimo rodiklio vertės (0,30) (Lytton *et al.* 1993).

DT bandymu esant 10 °C aukštesnei temperatūrai nei žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra nustatomos bandinio be pradinės įpjovos deformacijos jo suirimo metu turi būti ne mažesnės nei 1 %. Tokiu atveju daroma prielaida, kad tiriamąjį bitumą panaudojus asfalto mišinio gamybai, įrengtoje asfalto dangoje nepasireikš temperatūriniai plyšiai. Šis kriterijus yra įtrauktas į bitumo eksploatacinių charakteristikų reikalavimus (PG) atsparumui temperatūriniams plyšiams.

XXI a. pradžioje į Amerikos kelių ir transporto asociacijos standartus įtraukus temperatūrinių įtempių skaičiavimo modelį, kuriuo BBR bandymu prie skirtingų temperatūrų nustatytas bitumo lenkimo standis perskaičiuojamas į temperatūrinius įtempius, suformuluotas dar vienas kriterijus bitumo atsparumui temperatūriniams plyšiams vertinti. Daroma prielaida, kad bitumas tam tikroje temperatūroje yra atsparus temperatūrinių plyšių susidarymui, jei DT bandymu esant tam tikrai temperatūrai nustatyti temperatūriniai įtempiai bandinio suirimo metu yra dešinėje temperatūrinių įtempių kreivės pusėje.

Sui *et al.* (2011) nustatė stiprią koreliaciją tarp BBR bandymu nustatomų charakteristikų ir 4-mm DSR bandymu nustatomo bitumo kaupiamojo modulio, kuris perskaičiuojamas į bitumo įtempių relaksacijos modulį ir jo kitimo rodiklį. Remiantis šia koreliacija ir PG reikalavimais, atsparumui temperatūriniams plyšiams vertinti įvesti nauji kriterijai: bitumo įtempių relaksacijos modulis ir jo kitimo rodiklis po 7200 s. Siekiant sumažinti 4-mm DSR bandymo atlikimo laiką Farrar *et al.* (2015) pritaikė laiko-temperatūros superpozicijos principą ir atsižvelgiant į 10 °C aukštesnę bandymo temperatūrą bei ženkliai sumažėjusį atskaitinį laikotarpį (60 s) patikslino bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio kritines vertes. Riccardi *et al.* (2017b) taip pat analizavo BBR bandymu nustatomų charakteristikų ir 4-mm DSR bandymu nustatomo bitumo kaupiamojo modulio, kuris perskaičiuojamas į bitumo įtempių relaksacijos modulį ir jo kitimo rodiklį, priklausomybę. Remiantis gautais penkių tirtųjų bitumų rezultatais nustatytas apie 23 % didesnis bitumo įtempių relaksacijos modulio kriterijus ir apie 12 % mažesnis šio modulio kitimo rodiklio kriterijus nei pasiūlė Farrar *et al.* (2015).

Pabrėžtina, kad Sui *et al.* (2011), Farrar *et al.* (2015) ir Riccardi *et al.* (2017b) lygino bandymų rezultatus, gautus bandinius aušinant (šaldant) skirtingose terpėse. Atliekant 4-mm DSR bandymus bandiniai šaldomi ore, tuo tarpu BBR bandymų metu bandiniai yra įmerkami į etanolį. Marasteanu *et al.* (2012b) ir Falchetti *et al.* (2012, 2014) atlikti tyrimai parodė, kad bandymų rezultatams didelę įtaką daro bandinių temperatūrinis režimas, kurį lemia bandinio aušinimo (šaldymo) terpė. Todėl 4-mm DSR ir BBR bandymais gauti rezultatai yra nelygiaverčiai ir pasiūlyti kriterijai turi būti tikslinami. Tai patvirtina atlikti Riccardi *et al.* (2017a) tyrimai, kurių metu lyginti BBR bandymų rezultatai, kuomet bandiniai buvo au-

šinti (šaldyti) ir ore ir etanolyje, su 4-mm DSR bandymais nustatytu bitumo kaupiamuoju modulių, kuris buvo perskaičiuotas į bitumo įtempių relaksacijos modulį ir jo kitimo rodiklį. Gautos koreliacijos skyrėsi priklausomai nuo BBR bandymams taikytos bandinio aušinimo terpės. Griežtesni kriterijai nustatyti analizuojant BBR bandymų rezultatus, kuomet bandiniai aušinti ore.

Atlikti tyrimai grindžia irimo mechanikos dėsniais paremtų bitumo charakteristikų glaudžią koreliaciją su asfalto dangose nustatomu temperatūrinių plyšių intensyvumu (Hoare, Hesp 2000; Anderson *et al.* 2001; Kim *et al.* 2006). Todėl irimo energija, įtempių intensyvumo koeficientas, bandinio įlinkis veikiant jį didžiausia apkrova, efektyvusis darbas, plastiškasis darbas ir apytikslis plyšio viršūnės atsivėrimas yra tinkami rodikliai bitumo elgsenai neigiamose temperatūrose charakterizuoti. Tačiau įtempių intensyvumo koeficientui, efektyviajam darbui, plastiškajam darbui ir apytiksliam plyšio viršūnės atsivėrimui vis dar nėra nustatyta ribinių verčių, apibrėžiančių bitumo atsparumą temperatūriniais plyšiams. Tai yra viena iš pagrindinių mokslinių tyrimų krypčių, kurioje intensyviai dirbama. Jau yra nustatyta ir žinoma, kad irimo mechanikos dėsniais paremtų charakteristikų aukštesnės vertės lemia didesnę bitumo atsparumą temperatūrinių plyšių susidarymui. Pabrėžtina, kad taikant irimo mechanikos dėsniais paremtus kriterijus žemiausia kritine temperatūra laikoma 10 °C sumažinta bandymo metu nustatyta kritinė temperatūra ( $T_{cr, bandymo} - 10\text{ °C}$ ).

Kelių tiesyboje bitumo atsparumas temperatūriniais plyšiams vertinamas taikant 1.1 lentelėje pateiktus kriterijus ir jų ribines vertes bei sąlygas.

**1.1 lentelė.** Kriterijų ribinės vertės skirtos vertinti bitumo atsparumą temperatūriniais plyšiams

**Table 1.1.** Limiting values (criteria) for bitumen resistance to low temperature cracking

Kriterijus	Ribinė vertė (sąlyga) <sup>1)</sup>	Tyrimo metodas	Literatūros šaltinis
1	2	3	4
Trapumo temperatūra pagal Frasą	< nei žemiausia dangos paviršiaus temperatūra	Fraso bandymas	Fraass 1937
Penetracijos indeksas ( $I_p$ )	$\geq -1,5$	Penetracijos nustatymas esant 25 °C Minkštėjimo temperatūros nustatymas žiedo ir rutulio metodu	Roireau 1986, Boutin, Lupien 2000

1.1 lentelės tęsinys

1	2	3	4
McLedo bedimensinis penetracijos-klampos skaičius (PVN)	$\geq -0,6$ $\geq -1,0$	Penetracijos nustatymas esant 25 °C Kinematinės klampos nustatymas esant 135 °C	Robertson 1987
Bandinio suirimo (pasidalijimo į dvi dalis) deformacijos	$\geq 1 \%$	DT bandymas	Anderson, Kennedy 1993
Lenkimo standis po 60 s <sup>2, 3)</sup>	$\leq 300$ MPa	BBR bandymas	Anderson, Kennedy 1993, Anderson <i>et al.</i> 2001
Lenkimo standžio kitimo rodiklis po 60 s <sup>2, 3)</sup>	$\geq 0,30$		
Temperatūriniai įtempiai bandinio suirimo (pasidalijimo į dvi dalis) metu	virš temperatūrinių įtempių kreivės, apskaičiuotos taikant temperatūrinių įtempių skaičiavimo modelį	BBR ir DT bandymai	Bouldin <i>et al.</i> 2000
Žemiausios kritinės temperatūros padidėjimas dėl fizinio kietėjimo	$\leq 6$ °C	ExBBR bandymas	Hesp <i>et al.</i> 2009a
Žemiausia kritinė temperatūra	< nei žemiausia dangos paviršiaus temperatūra	ABCD bandymas	Kim 2005; Kim <i>et al.</i> 2006
Bitumo įtempių relaksacijos modulis po 7200 s	$\leq 160$ MPa	4-mm DSR bandymas	Sui <i>et al.</i> 2011
Bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklis po 7200 s	$\geq -0,26$		
Bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s <sup>2, 3)</sup>	$\leq 140$ MPa	4-mm DSR bandymas	Farrar <i>et al.</i> 2015
	$\leq 172$ MPa		Riccardi <i>et al.</i> 2017

1.1 lentelės pabaiga

1	2	3	4
Bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklis po 60 s <sup>2, 3)</sup>	$\geq -0,28$	4-mm DSR bandymas	Farrar <i>et al.</i> 2015
	$\geq -0,25$		Riccardi <i>et al.</i> 2017
Įtempių intensyvumo koeficientas ( $K_{Ic}$ ) <sup>3)</sup>	–	SENB bandymas	–
Irimo energija ( $G_f$ ) <sup>3)</sup>	$\geq 100 \text{ J/m}^2$	SENB bandymas (apkrovimo greitis 0,01 mm/s)	Hesp 2004
Bandinio įlinkis veikiant jį didžiausia apkrova, kuri fiksuojama prieš pat jam suyrant <sup>3)</sup>	$\geq 0,3 \text{ mm}$	SENB bandymas	<sup>4)</sup>
Irimo energija ( $G_{Ic}$ arba $J$ ) <sup>3)</sup>	$\geq 100 \text{ J/m}^2$	DENT bandymas (tempimo greitis 0,01 mm/s arba 0,001 mm/s)	Hesp 2004
Įtempių intensyvumo koeficientas ( $K_{Ic}$ ) <sup>3)</sup>	–	DENT bandymas (tempimo greitis 1,8 %/min)	–
Efektyvusis darbas ( $w_e$ ) <sup>3)</sup>	–	DENT bandymas (tempimo greitis 50 mm/min)	–
Plastiškasis darbas ( $w_p$ ) <sup>3)</sup>	–		–
Apytikslis plyšio viršūnės atsivėrimas <sup>3)</sup>		DENT bandymas	

Pastabos: <sup>1)</sup> – jei bitumas tenkina pateiktą ribinę vertę (sąlygą), tai jis yra atsparus temperatūriniams plyšiams

<sup>2)</sup> – taikomas laiko-temperatūros superpozicijos principas

<sup>3)</sup> – žemiausia kritinė temperatūra laikoma 10 °C sumažinta bandymo metu nustatyta kritinė temperatūra ( $T_{cr, \text{bandymo}} - 10 \text{ °C}$ )

<sup>4)</sup> – standartas LST CEN/TS 15963:2014 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumo trūkumui temperatūros nustatymas atliekant įpjauto strypo tritaškio lenkimo bandymą“



Laikomasi nuostatos, kad bitumas esant tam tikrai temperatūrai yra atsparus temperatūriniam plyšimui, jei tenkinama bent vieno 1.1 lentelėje pateikto kriterijaus ribinė vertė arba sąlyga. 1.1 lentelėje pateiktų kriterijų ribinės vertės ir sąlygos įprastai taikomos bitumo žemiausiai kritinei temperatūrai nustatyti. Ši temperatūra apibrėžiama kaip žemiausia dangos paviršiaus temperatūra, kuriai esant bitumas atlaiko susidariusius temperatūrinius įtempius, t. y. asfalto dangoje nesidaro temperatūriniai plyšiai.

### **1.3. Asfalto mišinių tyrimo metodai ir kriterijai, apibrėžiantys temperatūrinių plyšių susidarymą**

Asfalto mišinių tyrimo metodai, apibrėžiantys temperatūrinių plyšių susidarymą, pagal tyrimo metodikos principus skirstomi į tokias pačias tyrimo metodų grupes kaip ir bitumo tyrimo metodai, t. y. į:

- kontinuumo mechanika paremtus tyrimus;
- irimo mechanika paremtus tyrimus;
- akustine emisija paremtus tyrimus.

Visi asfalto mišinių tyrimo metodai, apibrėžiantys temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangoje, nepriklausomai nuo metodikos principų yra orientuoti į žemiausios kritinės temperatūros nustatymą.

#### **1.3.1. Kontinuumo mechanika paremti tyrimo metodai**

Kontinuumo mechanika paremtų tyrimo metodų koncepcija yra pateikta 1.2.1 skirsnyje ir 1.4 paveiksle. Pabrėžtina, kad šiuose tyrimo metoduose taikomi bandiniai be pradinės įpjovos. Kelių tiesyboje yra sukurti šie kontinuumo mechanika paremti asfalto mišinių tyrimo metodai:

- bandymai netiesioginio tempimo prietaisu (angl. *indirect tensile (IDT) tests*);
- bandymai lenkiamo strypelio reometru (angl. *bending beam rheometer (BBR) tests*);
- bandymai vienašio tempimo prietaisu ribojant (varžant) asfalto mišinio traukimąsi (angl. *thermal stress restrained specimen tests (TSRST)*);
- bandymai asfalto mišinio temperatūrinių plyšių susidarymo analizatoriumi (angl. *tests with asphalt thermal cracking analyser (ATCA)*).

Asfalto mišinių funkcionavimas neigiamose temperatūrose dažniausiai vertinamas atliekant IDT bandymus, kurių metu asfalto mišinio bandinyje imituojamas asfalto dangoje ties transporto priemonių ratais susidarantis įtempių būvis (Roque, Buttlar 1992). IDT bandymas sukurtas XX a. pabaigoje vykdant SHRP tyrimus

(Vinson *et al.* 1989; Lytton *et al.* 1993; Buttlar, Roque 1994). Tačiau XXI a. taikoma IDT bandymo procedūra ženkliai skiriasi nuo tuometinės versijos. Tai lėmė Christensen ir Bonaquist (2004) atlikto tyrimo rezultatai, kurių pagrindu atnaujinta bandymo procedūra ir skaičiavimo algoritmai. IDT bandymu nustatomas asfalto mišinio valkšnumas ir stipris. Būtent šie du rodikliai yra pagrindiniai parametrai siekiant prognozuoti temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi temperatūrinių plyšių prognozavimo modeliu, įtrauktu į mechanistinę empirinę dangų konstrukcijų projektavimo gidą (Hallin 2004). Šis temperatūrinių plyšių prognozavimo modelis yra atnaujinta SHRP tyrimo Nr. A-005 metu sukurto temperatūrinių plyšių susidarymo prognozavimo metodo versija (Vinson *et al.* 1989; Lytton *et al.* 1993).

IDT valkšnumo nustatymo bandymas atliekamas prie trijų skirtingų temperatūrų, pasirenkamų atsižvelgiant į asfalto mišinio gamybai naudoto bitumo žemiausią kritinę temperatūrą. Pastaroji nustatoma pagal PG reikalavimus bitumo atsparumui temperatūriniais plyšiams. Prie kiekvienos temperatūros nustatytas asfalto mišinio valkšnumo kitimas laiko atžvilgiu perskaičiuojamas į temperatūrinius įtempius ir sudaroma temperatūrinių įtempių kitimo priklausomai nuo temperatūros kreivė. Žemiausia kritine temperatūra laikoma temperatūra, kuriai esant susikerta temperatūrinių įtempių ir asfalto mišinio stiprio kreivės. Šis asfalto mišinių tyrimo metodas taikytinas tiek laboratorijoje suformuotiems bandiniams, tiek ir iš eksploatuojamų kelių išgręžtiems bandiniams. Pagrindinis IDT bandymo trūkumas – bandymo imlumas laikui, nes bandiniai prieš bandymą išlaikomi bandymo temperatūroje  $3 \pm 1$  val. ir patikimiems rezultatams gauti reikalinga išbandyti mažiausiai 4 bandinius.

Zofka *et al.* (2005) pasiūlė kitą metodą asfalto mišinio valkšnumui nustatyti. Šis metodas paremtas trijų taškų lenkimu ir gali būti atliekamas taikant bitumo tyrimams naudojamą lenkiamo strypelio reometrą, jei pastaruoju perduodama 450–500 g apkrova. Pabrėžtina, kad bandymui taikytinas bandinio dydis ( $127 \times 12,7 \times 6,35$  mm) pažeidžia asfalto mišinio reprezentatyvumo koncepciją, nes suformuotos sijelės storis (6,35 mm) dažniausiai yra mažesnis nei didžiausia asfalto mišinio užpildo dalelė. Tačiau visa eilė atliktų mokslinių tyrimų grindžia šio metodo tinkamumą nustatyti asfalto mišinio valkšnumą (Zofka *et al.* 2005; Zofka *et al.* 2008a; Zofka *et al.* 2008b; Ho, Romero 2011; Velasquez *et al.* 2011). Be to, Weissman *et al.* (1999) ir Romero *et al.* (2001) atlikti tyrimai parodė, kad reprezentatyvaus tūrio bandinio koncepcijos įtaka gaunamiems rezultatams ženkliai sumažėja atliekant bandymus neigiamose temperatūrose. Marasteanu *et al.* (2016) dar kartą patvirtino BBR tinkamumą asfalto mišinio valkšnumui nustatyti, tačiau nurodė, kad ne mažiau kaip trys bandiniai turi būti išbandomi toje pačioje temperatūroje. Ši mokslininkų grupė taip pat nustatė, kad bandinių gamybos metu leidžiamas ne didesnis kaip  $\pm 0,5$  mm nuokrypis lemia beveik dvigubai mažesnę variacijos koeficientą (9,43 %) nei yra įprastai nustatomas kitais asfalto mišinių

tyrimo metodais (Ho, Romero 2011). Asfalto mišinio valkšnumo, nustatyto BBR bandymu, pakartojamumas kinta nuo 4 % iki 13 % (Velasquez *et al.* 2011).

Lyginant valkšnumo kitimą laiko atžvilgiu, nustatytą BBR ir IDT bandymais, pastebimas nedidelis nuokrypis tarp rezultatų. Atlikti bandomieji temperatūrinių plyšių prognozavimo skaičiavimai taikant BBR bandymais nustatytą valkšnumą vietoje IDT bandymais nustatyto valkšnumo grindžia šių duomenų taikymo tinkamumą (Zofka *et al.* 2008b). Skirtumą tarp rezultatų galima lemti skirtinga bandinio aušinimo (šaldymo) terpė. Velasquez *et al.* (2011) nustatė, kad bandinio, aušinamo (šaldomo) ore, standis yra 8 % didesnis nei jį laikant etanolyje. Atkreiptinas dėmesys, kad BBR bandymas atliekamas etanolyje, o IDT – ore. Falchetto *et al.* (2012, 2014) pasiūlė BBR bandymą taikyti ne tik asfalto mišinio valkšnumo nustatymui, bet ir stipriui. Šiuo atveju reometro apkrovimo galia turi siekti ne mažiau kaip 44 N. Tačiau Marasteanu *et al.* (2016) nustatė, kad BBR bandymas nėra tinkamas asfalto mišinio stipriui nustatyti dėl nereprezentatyvaus bandinio, t. y. dėl per mažų bandinio matmenų lyginant su asfalto mišinio užpildo didžiausios dalelės dydžiu, nepaisant to, kad šio principo nesilaikymas neturi įtakos asfalto mišinio valkšnumo nustatymui.

TSRST bandymo koncepciją sukūrė Monismith *et al.* (1965), tačiau galutinę bandymo procedūrą išvystė Jung ir Vinson (1994) vykdant mokslinį tyrimą Nr. A-400 pagal SHRP. Tai vienintelis asfalto mišinių tyrimo metodas, kuriame temperatūra ir bandinio apkrovimas kinta tuo pačiu metu. TSRST bandymo metu nustatomi asfalto mišinio temperatūriniai įtempiai (stipris), žemiausia kritinė temperatūra, kuriai esant bandys suyra, ir pereinamoji temperatūra, kuriai esant pasikeičia asfalto mišinio elgsena iš tamprios į tamptai klampią arba atvirkščiai. Nustatyta, kad žemiausia kritinė temperatūra stipriai koreliuoja su pereinamąja temperatūra, todėl žinant bent vieną iš jų galima apskaičiuoti kitą. Nors TSRST bandymas nėra įtrauktas į asfalto mišinių reikalavimus, tačiau jis plačiai taikomas Europoje. Įprastai asfalto mišinių vertinimui atsparumo temperatūriniais plyšiams aspektu taikomas ne asfalto mišinio temperatūrinių įtempių (stiprio) kriterijus, o žemiausia kritinė temperatūra, kadangi pastaroji pasižymi mažesniu variacijos koeficientu (Marasteanu *et al.* 2007).

TSRST bandymo rezultatams įtakos turi bitumo klasė, nustatoma pagal PG reikalavimus, ir asfalto mišinio amžius (Isacsson, Zeng 1998b; Lu, Isacsson 2001). Kuo kietesnis bitumas (aukštesnė bitumo klasė) ir (arba) senesnis asfalto mišinys, tuo aukštesnė (mažiau neigiama) asfalto mišinio žemiausia kritinė temperatūra. Tiriant tam tikrą laikotarpį eksploatuotus arba laboratorinėmis sąlygomis pasendintus asfalto mišinius nustatyta, kad bitumo modifikavimui taikytas polimerų tipas, rišklio išgavimo šaltinis ir asfalto mišinio oro tuštymių kiekis yra svarbūs veiksniai, lemiantys TSRST bandymo rezultatus (Isacsson, Zeng 1998a; Isacsson, Zeng 1998b).

TSRST bandymui taikomi cilindro arba stačiakampio formos bandiniai. Nustatyta, kad naudojant cilindro formos bandinius gaunama šiek tiek žemesnė žemiausia kritinė temperatūra nei naudojant stačiakampio formos bandinius (Marasteanu *et al.* 2007). Tačiau daug reikšmingesnę įtaką bandymo rezultatams turi bandinių aušinimo (šaldymo) greitis. Įprastai asfalto mišinio temperatūra kelyje žemėja 1–2 °C/val. greičiu priklausomai nuo vietoje vyraujančio klimato. Toks bandinių aušinimo (šaldymo) greitis TSRST bandymo metu lemtų neracionalų bandymo atlikimo laiką. Mokslinių tyrimų rezultatai parodo, kad bandinių aušinimo (šaldymo) greičio padidinimas nuo 1 °C/val. iki 10 °C/val. lemia 5 °C aukštesnę žemiausią kritinę temperatūrą (Jung, Vinson 1993). Tačiau siekiant užtikrinti priimtina TSRST bandymo atlikimo laikotarpį neatsižvelgiama į 10 °C/val. bandinių aušinimo (šaldymo) greičio įtaką bandymų rezultatams ir TSRST bandymas visuotinai atliekamas esant būtent šiam bandinių aušinimo (šaldymo) greičiui. Taikant 10 °C/val. bandinių aušinimo (šaldymo) greitį bandymas įprastai trunka apie 4 val. Dar vienas ne mažiau svarbus TSRST bandymo trūkumas – bandinių centravimas. Net smulkmeniškiausiai atliekant bandinių centravimą bandymo metu bandinyje vis tiek pasireiškia lenkimas, lemiantis nevienodą įtempių pasiskirstymą bandinyje. Todėl TSRST bandymu nustatyti įtempiai turi būti perskaiciuojami taikant specialius skaičiavimo metodus. Šių metodų taikymas lemia stipresnę koreliaciją tarp TSRST bandymu nustatytų asfalto mišinio įtempių ir faktinio temperatūrinių plyšių intensyvumo (Velásquez *et al.* 2009).

ATCA bandymo metodas yra ženkliai patobulintas TSRST bandymas, įgalinantis tuo pačiu metu išbandyti du bandinius esant tam pačiam temperatūriniam režimui. Pirmojo bandinio (sijos) deformavimasis bandymo metu nėra apribojamas (savaržomas), todėl pagal bandymo rezultatus nustatoma asfalto mišinio stiklėjimo temperatūra ir plėtimosi (traukimosi) koeficientas. Antrojo bandinio (sijos) deformavimasis yra apribotas kaip ir TSRST bandyme, todėl pagal bandymo rezultatus nustatomi asfalto mišinio temperatūriniai įtempiai (stipris) ir žemiausia kritinė temperatūra, kuriai esant bandinys suyra. Kadangi ATCA bandymo metu galima imituoti temperatūrų pasikartojimą ir (arba) jų išlaikymą tam tikrą laiką, tai šis tyrimo metodas taip pat galimai galėtų būti taikomas nustatyti asfalto mišinio atsparumą temperatūriniams plyšiams dėl ciklinio temperatūrų poveikio, asfalto mišinio fizinių kietėjimą ir asfalto mišinio įtempių relaksacijos modulį (Bahia *et al.* 2012a; Baglieri *et al.* 2012; Bahia *et al.* 2012b; Tabatabaee *et al.* 2012). Bahia *et al.* (2012b) atlikto tyrimo metu nustatyta, kad temperatūra, kuomet temperatūriniai įtempiai bandinyje, aušinamame (šaldomame) pastoviu greičiu, yra tokie patys kaip įtempiai bandinyje, laikomame izotermiškai, skiriasi 12 °C. Tai pagrindžia asfalto mišinių fizinio kietėjimo vertinimo poreikį.

ATCA kūrimo metu pastebėta, kad dažnai bandymo metu neužtikrinama pakankama adhezija tarp metalinių plokštelių, ribojančių bandinio deformavimąsi, ir paties bandinio. Siekiant padidinti adheziją metalinių plokštelių paviršiui buvo

suteikta grubi tekstūra. Bandinių centravimo problema, identifikuota TSRST bandyme, kuriant ATCA tyrimo metodą išspręsta numatant patobulintą bandinio pritvirtinimo prie plokštelių metodą, kurį išsamiai aprašė Bahia *et al.* (2012a).

### 1.3.2. Irimo mechanika paremti tyrimo metodai

Kontinuumo mechanika paremti asfalto mišinių tyrimo metodai neįvertina temperatūrinių plyšių vystymosi. Be to, pastebėta, kad TSRST bandymo metu temperatūriniai įtempiai dažnai koncentruojasi ties bandinio galais, bandinio suirimas (pasidalinimas į dvi dalis) įvyksta bet kurioje bandinio vietoje ir suirimo plokštuma dažniausiai nėra statmena bandinio skerspjūviui. Šie aspektai nėra pageidautini, nes pagal TSRST bandymui taikomą prielaidą bandinys turėtų suirti ties viduriu ir bandinio suirimo plokštuma turėtų būti statmena bandinio skerspjūviui. Siekiant eliminuoti šiuos veiksnius ir geriau charakterizuoti temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose pradėti vystyti irimo mechanika paremti asfalto mišinių tyrimo metodai.

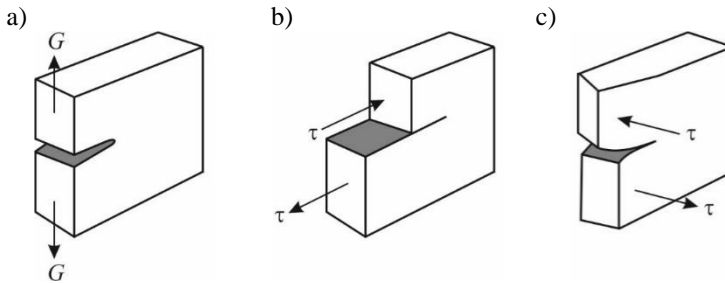
Irimo mechanika paremtų tyrimo metodų koncepcija yra pateikta 1.2.2 skirsnyje ir 1.4 paveiksle. Pabrėžtina, kad šiuose tyrimo methoduose taikomi įpjauti (su suformuotu pradiniu plyšiu) bandiniai, todėl plyšys vystosi ties bandinio įpjova ir tokiu būdu galima įvertinti plyšio vystymąsi (atsivėrimą). Pagal įtempių ir deformacijų būvį plyšio viršūnėje, yra trys irimo būdai (1.5 pav.): I – tempimo (atsivėrimo), II – skersinės šlyties ir III – išilginės šlyties (sukimo).

Kelių tiesyboje yra sukurti šie irimo mechanika paremti asfalto mišinių tyrimo metodai:

- lenkimo bandymai veikiant vienai koncentruotai apkrovai su ties bandinio (sijos) viduriu iš apačios link viršaus įpjautu bandiniu (angl. *single-edge-notched beam (SE(B)) tests*);
- pusapvalio bloko lenkimo bandymai su ties bandinio viduriu iš apačios link viršaus įpjautu bandiniu (angl. *semi-circular bending (SCB) tests*);
- disko formos įpjauto bandinio tempimo bandymai (angl. *disc-shaped compact tension (DC(T)) tests*);
- Fenikso bandymas (angl. *Fenix test*);
- bandymai asfalto mišinio pleišėjimo prietaisu (angl. *tests with asphalt concrete cracking device (ACCD)*);

SE(B) bandymas yra vienas iš seniausių ir plačiausiai taikomų tiesiškai tamprios irimo mechanikos dėsniais paremtų bandymų asfalto mišinio irimo energijai  $G_f$  ir įtempių intensyvumo koeficientui  $K_{Ic}$  nustatyti (Moavenzadeh 1967). Bandymui taikomas ties bandinio (sijos) viduriu iš apačios link viršaus įpjautas bandinys (sija), kuris bandymo metu dedamas ant dviejų, simetriškai vienas nuo kito nutolusių ir apie savo ašį bandinio deformavimo metu besisukančių strypų. Bandinys deformuojamas ties bandinio viduriu iš viršaus veikiama gniuždančiąja

apkrova. Toks bandinio deformavimo principas imituoja I-ąjį irimo būdą, t. y. tempimą (atsivėrimą).



**1.5 pav.** Irimo būdai: a) I – tempimo (atsivėrimo); b) II – skersinės šlyties; c) III – išilginės šlyties (sukimo) (Javatilaka 1979)

**Fig. 1.5.** Modes of fracture: a) I – tension (opening); b) II – sliding (shear); c) III – tearing (torsion) (Javatilaka 1979)

Moksliniai tyrimai grindžia SE(B) bandymo taikymą mišraus irimo (I-ojo ir II-ojo irimo būdų) imitavimui. Tokiu atveju bandinys įpjauamas ne ties bandinio (sijos) viduriu, o tam tikru atstumu nuo vidurio (John, Shah 1990; Guo *et al.* 1995). Mišraus irimo būdų taikymas tiriant asfalto dangas yra itin svarbus, nes pažaidos susidaro ne tik dėl temperatūrinių įtempių poveikio, bet ir dėl transporto priemonių apkrovų poveikio.

SE(B) bandinių (sijų) dydis tenkina asfalto mišinio reprezentatyvumo koncepciją, tačiau dėl stačiakampio formos komplikuoja iš eksploatuojamų kelių paimtų gręžtinių ėminių (kernų) tyrimą bei reikalauja nestandartizuotos laboratorinės įrangos bandinių gamybai įsigijimo. Tai pagrindinė priežastis kodėl SE(B) bandymas nėra pagrindinis asfalto mišinių tyrimo metodas atsparumui temperatūriniams plyšiams vertinti. Be to, šis tyrimo metodas nėra standartizuotas, todėl mokslininkai bandymo atlikimui taiko skirtingo dydžio bandinius, formuoja skirtingo dydžio įpjovas ir naudoja skirtingus irimo būdus (Kim, El Hussein 1997; Bhurke *et al.* 1997; Marasteanu *et al.* 2002; Wagoner *et al.* 2005a). Visi šie veiksniai turi įtakos bandymo rezultatams ir dėl šių priežasčių rezultatų tarpusavio lyginimas tampa itin komplikotas. Tačiau SE(B) bandymo pakartojamumas yra pakankamas: variacijos koeficientas kinta nuo 3 % iki 28 % (Mobasher *et al.* 1997). Šis bandymas taip pat gali būti taikomas įvertinti asfalto mišinių atsparumą temperatūrinių plyšių susidarymui dėl ciklinio temperatūrų poveikio (Hofman *et al.* 2003).

SCB bandymo principas sukurtas 1984 m. uolienų savybėms tirti. 2000 m. J. M. M. Molenaar ir A. A. A. Molenaar šį bandymo metodą pritaikė asfalto mišinių atsparumui temperatūriniams plyšiams tirti remiantis irimo energija  $G_f$  ir įtempių

intensyvumo koeficientu  $K_{Ic}$ . Bandymui atlikti taikomas pusapvalio bloko formos bandinys, kuriame ties bandinio viduriu išilgai bandinio simetrijos ašiai iš apačios link viršaus yra suformuota įpjova (pradinis plyšys). Tai leidžia tirti iš eksploatuojamų kelių paimtus gręžtinius ėminius (kernus) ir nereikalauja nestandartinės įrangos įsigijimo bandinių gaminimui laboratorijoje. Bandymo metu bandinys dedamas ant dviejų, simetriškai vienas nuo kito nutolusių ir apie savo ašį bandinio deformavimo metu besisukančių strypų. Bandinys deformuojamas ties bandinio viduriu iš viršaus veikiama gniuždančiąja apkrova taip, kad plyšys bandinyje vystytųsi pastoviu greičiu, t. y. išlaikomas pastovus plyšio viršūnės atsivėrimas (angl. *crack mouth opening displacement*). Tačiau toks bandinio apkrovimo tipas lemia „arkos“ efektą ir ties plyšio viršūne susidaro dideli gniuždomieji įtempiai, dėl kurių prasideda nepageidaujamas plyšio vystymasis. Taip pat nustatytas dar vienas SCB bandymo trūkumas – santykinai maža erdvė plyšio vystymuisi (angl. *ligament*). Kuo mažesnė plyšio vystymosi erdvė, tuo mažesnis rezultatų patikimumas. Plyšio vystymosi erdvę SCB bandyme apriboja bandymui taikomas bandinio dydis – per pusę padalintas 150 mm skersmens laboratorijoje suformuotas arba iš eksploatuojamo kelio paimtas gręžtinis ėminys (kernas).

Li ir Marasteanu (2004) nustatė, kad SCB bandymo rezultatų variacijos koeficientas kinta nuo 15 % iki 34 %. Zofka ir Braham (2009) palygino SCB, IDT ir DC(T) bandymo rezultatus su asfalto dangose susidariusių temperatūrinių plyšių intensyvumu. Tyrimo metu gauta, kad irimo energija  $G_f$ , nustatyta SCB bandymo metu, geriausiai charakterizuoja asfalto mišinio atsparumą temperatūriniais plyšiams. Tačiau SCB bandymo rezultatams įtakos turi užpildo tipas, asfalto mišinio oro tuštymų kiekis bei aplinkos temperatūra (Li *et al.* 2008; Marasteanu *et al.* 2012). Asfalto mišiniai, kurių gamybai taikomas granitas, yra atsparesni temperatūrinių plyšių susidarymui nei asfalto mišiniai, pagaminti naudojant kalkakmenį. Kuo poringesnis asfalto mišinys, tuo greičiau senėja bitumas, o tai lemia spartesnę temperatūrinių plyšių atsivėrimą ir vystymąsi.

2012 m. Marasteanu *et al.* pasiūlė standartinę SCB bandymo metodiką taikyti ne tik irimo mechanikos charakteristikoms nustatyti, bet ir asfalto mišinio valkšnumui įvertinti. Tyrimų metu gauta, kad asfalto mišinio valkšnumas, apskaičiuotas pagal SCB bandymo rezultatus, koreliuoja su BBR ir IDT bandymais nustatytomis asfalto mišinio valkšnumo kitimo kreivėmis. Šių tyrimų metu SCB bandymui taikyta viršutinė per pusę perpjauto IDT bandymui naudoto bandinio pusė.

DC(T) bandymo metodiką išvystė Wagoner *et al.* (2005b). Bandymo metu disko formos įpjautas (su pradiniu plyšiu) bandinys tempiamas tokiu greičiu, kad būtų užtikrinamas pastovus plyšio viršūnės atsivėrimas, matuojamas ties plyšio viršūne pritvirtintu matuokliu. Tokia bandinio forma leidžia tirti iš eksploatuojamų kelių paimtus gręžtinius ėminius (kernus) ir nereikalauja nestandartinės įrangos bandinių gaminimui laboratorijoje.

Atliekant pirmuosius DC(T) bandymus pastebėta, kad apie 50 % bandinių suyra ties bandinyje esančiomis tempimo skylėmis, o ne ties bandinio įpjova. To priežastis – per mažas atstumas tarp bandinio krašto ir tempimo skylės krašto, t. y. nepakankamas asfalto mišinio kiekis. Tokia tempimo skylių padėtis buvo pasirinkta siekiant padidinti plyšio atsivėrimo erdvę. Tačiau dėl netinkamo bandinių suirimo tempimo skylės buvo perslinktos link bandinio vidurio. Šis perslinkimas lėmė pageidaujamą bandinio suirimą, t. y. ties bandinio įpjova (pradiniu plyšiu) (Wagoner *et al.* 2005b).

Analizuojant asfalto mišinių tyrimo metodų, paremtų irimo mechanika, rezultatų pakartojamumą, DC(T) bandymas išskirtinas kaip vienas pranašiausių. Wagoner *et al.* (2005b) nustatė, kad DC(T) bandymo rezultatų variacijos koeficientas kinta nuo 4 % iki 17 % priklausomai nuo bandymo temperatūros. Kuo žemesnė temperatūra, tuo didesnis variacijos koeficientas. DC(T) bandymu nustatomos irimo energijos  $G_f$  vertė priklauso nuo bandinio geometrijos. Kuo didesnis bandinio skersmuo arba storis, tuo didesnė irimo energijos vertė (Wagoner, Buttlar 2007; Li *et al.* 2008). Todėl lyginant skirtingų bandymų rezultatus svarbu užtikrinti, kad tų bandymų atlikimui buvo taikyta ne tik ta pati bandymo procedūra, bet ir bandinio geometrija.

Marasteanu *et al.* (2012) pasiūlė standartinę DC(T) bandymo metodiką pritaikyti asfalto mišinio valkšnumui įvertinti. Tyrimų metu gauta, kad asfalto mišinio irimo energija  $G_f$ , nustatyta atlikus valkšnumo bandymą, statistiškai nesiskiria nuo irimo energijos  $G_f$ , nustatytos pagal standartinę DC(T) bandymo metodiką. Vadinasi, DC(T) bandymas taikytinas ne tik asfalto mišinio irimo mechanikos dėsnių charakteristikoms nustatyti, bet ir valkšnumui įvertinti. Pabržėtina, kad abiejų bandymų atlikimui naudojamas tas pats bandinys: pirmiausiai atliekamas valkšnumo nustatymo bandymas ir po jo irimo energijos nustatymo bandymas.

Remiantis atliktais Marasteanu *et al.* (2012) moksliniais tyrimais, Jungtinėse Amerikos Valstijose DC(T) bandymas iš pat pradžių pripažintas tinkamu tyrimo metodu asfalto mišinio atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti, o SCB bandymo taikymas iš pradžių buvo siūlomas tik kaip alternatyvus tyrimo metodas, ypač taikytinas ploniems asfalto dangos sluoksniams tirti. Vėliau abu asfalto mišinių tyrimų metodai buvo standartizuoti. Tačiau Mandal *et al.* (2017) nerekomenduoja DC(T) bandymo taikyti asfalto mišinių reitingavimui atsparumo temperatūriniais plyšiams aspektu, nes atlikto tyrimo metu pastebėta, kad keičiant tam tikrus asfalto mišinio projektinius parametrus gaunama ne logiška irimo energijos kitimo tendencija. Pavyzdžiui, asfalto mišinio gamybai taikant labiau modifikuotą bitumą irimo energija mažėja, nors yra žinoma, kad modifikuoto bitumo naudojimas pagerina asfalto mišinio atsparumą temperatūriniais plyšiams.

Fenikso bandymą sukūrė Pérez-Jiménez *et al.* (2010). Bandymo metu pusapvalio bloko formos bandinys su ties bandinio viduriu iš apačios link viršaus įpjautu bandiniu (bandinio forma analogiška SCB bandymo metu taikomai bandinio



formai) pritvirtinamas prie dviejų plieninių plokštelių, kurios tempiamos viena nuo kitos 1 mm/min greičiu. Plieninės plokštelės prie tempimo įrenginio tvirtinamos taip, kad galėtų laisvai pasisukti. Bandymo metu nustatoma išsklaidyta energija  $G_D$ . Bandymo rezultatams bandinio tempimo greitis praktiškai neturi įtakos, tačiau bitumo kiekis asfalto mišinyje yra vienas iš pagrindinių veiksnių lemiančių bandinio irimo metu išsklaidomą energiją. Kuo didesnis bitumo kiekis naudojamas asfalto mišinio gamybai, tuo didesnė energija išsklaidoma vystantis plyšiui (Pérez-Jiménez *et al.* 2010). Tiriant skirtingus asfalto mišinius nustatyta, kad žeminant bandymo temperatūrą skirtumas tarp šių mišinių bandymo rezultatų taip pat mažėja. Esant labai žemoms temperatūroms asfalto mišinys pradeda elgtis kaip tamprus kietas kūnas, t. y. išsklaidoma energija plyšio vystymosi metu ir asfalto mišinio valkšnumas praktiškai nekinta (Pérez-Jiménez *et al.* 2013).

Fenikso bandymo rezultatai pasižymi geru pakartojamumu ir glaudžiai koreliuoja su SCB bandymo rezultatais (Pérez-Jiménez *et al.* 2010; Pérez-Jiménez *et al.* 2013). Tačiau esant pakankamai neigiamose temperatūroms Fenikso rezultatai varijuoja labiau nei SCB bandymo rezultatai. Pavyzdžiui, Fenikso bandymą atliekant esant 15 °C bandymo temperatūrai variacijos koeficientas yra 17 %, kai tuo tarpu SCB bandymo – 10 % (Pérez-Jiménez *et al.* 2013).

ACCD bandymo metodas sukurtas siekiant tiesiogiai (eliminuojuant skaičiavimus) nustatyti asfalto mišinio žemiausią kritinę temperatūrą imituojant realias asfalto dangos traukimosi sąlygas (Kim *et al.* 2009). Bandymo principas panašus į ABCD bandymo koncepciją. Suformuotas žiedo formos bandinys su šone esančia įpjova (pradiniu) plyšiu užmaunamas ant 60 mm skersmens invarinio žiedo (vidinės skylės skersmuo 24 mm), pasižyminčio itin mažu temperatūriniu traukimosi koeficientu. Būtent šis žiedas apriboja bandinio traukimąsi ir lemia plyšio vystymąsi. Bandymo metu bandinys šaldomas 10 °C/val. greičiu kol bandinys suyra. Temperatūra, kuriai esant bandinys suyra laikoma žemiausia kritine temperatūra. ACCD bandymas pasižymi itin dideliu pakartojamumu: standartinis nuokrypis yra mažesnis nei 1 °C. Be to, šis tyrimo metodas glaudžiai koreliuoja su TSRST bandymu (koreliacijos koeficientas 0,87) (Kim *et al.* 2010).

### 1.3.3. Akustine emisija paremti tyrimo metodai

Ankstesniuose skyreliuose aptarti asfalto mišinių funkcionavimo neigiamose temperatūrose tyrimo metodai reikalauja didelių laiko sąnaudų bei specializuotų brančių tyrimo prietaisų (deformavimo mašinų), o tai yra ekonomiškai nenaudinga. Todėl mokslininkai pradėjo ieškoti inovatyvių, greitų, nesudėtingų ir ekonomiškai naudingų asfalto mišinių atsparumo temperatūriniais plyšiams tyrimo metodų. Būtent akustine emisija paremti asfalto mišinių tyrimų metodai atitiko mokslininkų lūkesčius (Buttler *et al.* 2011). Šių tyrimo metodų koncepcija aprašyta 1.2.3 skirsnyje.

Bandymo metu nustatomos dvi žemiausios kritinės temperatūros. Pirmoji temperatūra fiksuojama tuomet, kai įvyksta pirmoji pagrindinė (didesnė) akustinė emisija. Pastaroji charakterizuoja mikro plyšių susidarymą. Antroji temperatūra fiksuojama, kai išskiriama didžiausia energija. Ši energija siejama su makro plyšių susidarymu (Behnia *et al.* 2010, Apeagei *et al.* 2009). Pabrėžtina, kad pirmoji temperatūra visada yra aukštesnė nei antroji ir asfalto mišinių reitingavimui atsparumo temperatūriniais plyšiams aspektu įprastai taikoma pirmoji žemiausia kritinė temperatūra. Behnia (2013) atliktas tyrimas parodė, kad laboratorijoje suformuoti asfalto mišinio bandiniai pasižymi aukštesne pirmąja žemiausia kritine temperatūra nei bitumo žemiausia kritinė temperatūra, nustatyta pagal PG reikalavimus, tačiau antroji žemiausia kritinė temperatūra dažniausiai yra artima bitumo žemiausiai kritinei temperatūrai. Asfalto mišinio žemiausia kritinė temperatūra priklauso nuo bandinio amžiaus: kuo bandinys senesnis, tuo aukštesnė žemiausia kritinė temperatūra (Buttlar *et al.* 2011).

Akustine emisija paremtų asfalto mišinių tyrimo metodų privalumas, kad jais nustatomas ne tik asfalto mišinio funkcionavimas neigiamose temperatūrose, bet taip pat užfiksuojami ir tiksliai identifikuojami visi (mikro ir makro lygmenyje) susidarantys plyšiai (Li, Marasteanu 2004). Be to, akustine emisija paremti asfalto mišinių tyrimo metodai gali būti taikomi asfalto mišinių kokybei kontroliuoti, nes jais identifikuojamas naudoto asfalto taikymas asfalto mišinyje (Buttlar *et al.* 2011; Behnia *et al.* 2011).

Bandymui taikomas 150 mm skersmens ir 50 mm aukščio per pusę padalintas cilindro formos (pusapvalio bloko) bandinys. Bandymo metu bandinys šaldomas pastoviu greičiu tol, kol jame susiformuoja makro plyšys, t. y. užfiksuojama antroji žemiausia kritinė temperatūra. Nustatyta, kad pirmosios žemiausios kritinės temperatūros variacijos koeficientas kinta nuo 2,69 % iki 9,74 %, o antrosios žemiausios kritinės temperatūros – nuo 1,40 % iki 6,24 % (Buttlar *et al.* 2011). Vadinasi, akustine emisija paremtu asfalto mišinių tyrimo metodu gaunami patikimesni bandymo rezultatai nei TSRST, SCB ir DC(T) bandymais.

Behnia (2013) analizavo šaldomo bandinio temperatūros kitimą bandinio viduje ir nustatė, kad esant žemesnei nei  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai temperatūrų skirtumas tarp bandinio paviršiuje užfiksuotos temperatūros ir bandinio centre esančios temperatūros yra nereikšmingas. Kadangi temperatūriniai plyšiai asfalto dangoje įprastai pasireiškia esant ženkliai žemesnei temperatūrai nei  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tai žemiausia kritinė temperatūra akustine emisija paremtame bandyme fiksuojama daviklius tvirtinant bandinio paviršiuje, o ne bandinio viduje ir tai užtikrina patikimų rezultatų gavimą. Atliktas bandinio storio įtakos žemiausiai kritinei temperatūrai tyrimas parodė, kad siekiant užtikinti rezultatų pakartojamumą ir patikimumą bandinio storis turi būti ne mažesnis kaip 40 mm (Behnia 2013).

### 1.3.4. Kriterijai asfalto mišinio atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti

Moksliniai tyrimai rodo, kad bitumui taikomi PG reikalavimai atsparumo temperatūriniais plyšiams aspektu dažnai neužtikrina asfalto dangų funkcionavimo be temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi. Todėl atsirado poreikis įvesti kriterijus, įvertinančius asfalto mišinio atsparumą temperatūriniais plyšiams. Sukaupta patirtis ir įgytos žinios rodo, kad temperatūrinių plyšių susidarymas ir vystymasis kontroliuojamas apribojant asfalto mišinio standį arba relaksacijos modulį. Deme ir Young (1987) analizavo asfalto mišinio standžio priklausomybę nuo dangos funkcionavimo ir nustatė, kad asfalto dangose, kurių asfalto mišinio standis po 180 s nuo apkrovimo pradžios yra didesnis nei 10 GPa, susiformuoja temperatūriniai plyšiai. Ši nuostata sutampa su SHRP inicijuotų tyrimų metu gautomis išvadomis.

Kitas kriterijus, taikytinas asfalto mišinio atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti, yra žemiausia kritinė temperatūra. Siekiant eliminuoti temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose ši temperatūra turi būti žemesnė nei tikėtina žemiausia asfalto dangos paviršiaus eksploatacinė temperatūra. TSRST bandymu ši temperatūra nustatoma tiesiogiai. Tuo tarpu atliekant IDT bandymus, kuriais nustatomas asfalto mišinio valkšnumas ir stipris, žemiausia kritinė temperatūra, nustatoma pagal temperatūrinių įtempių, apskaičiuotų pagal asfalto mišinio valkšnumą, ir stiprio kitimo priklausomai nuo temperatūros kreivių sankirtą (Vinson *et al.* 1989; Lytton *et al.* 1993). Šis asfalto mišinių atsparumo temperatūriniais plyšiams vertinimo principas pritaikytas temperatūrinių plyšių prognozavimo modelyje, įtrauktame į mechanistinį empirinį dangų konstrukcijų projektavimo gidą (Hallin 2004). Tačiau atlikti tyrimai rodo, kad žemiausia kritinė temperatūra, nustatyta pagal IDT bandymų rezultatus, yra žemesnė nei bitumo žemiausia kritinė temperatūra, nustatyta pagal PG reikalavimus (Zofka, Braham 2009). Atsižvelgiant į tai, bitumo žemiausia kritinė temperatūra turėtų užtikrinti asfalto dangų atsparumą temperatūriniais plyšiams, tačiau sukaupia patirtis rodo priešingą situaciją. Todėl IDT bandymais nustatoma žemiausia kritinė temperatūra nėra tinkamiausias kriterijus asfalto mišinio atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti.

Jones *et al.* (2014) atliko eksploatuojamų kelių ruožų apžiūras, kurių metu identifiko temperatūrinių plyšių intensyvumą kiekviename tiriamajame kelio ruože, bei paėmė gręžtinius ėminius BBR bandymų atlikimui. Pagal gautus laboratorinių bandymų rezultatus ir tiriamuosiuose ruožuose nustatytus temperatūrinių plyšių intensyvumus buvo sudarytos kreivės, identifikuojančios asfalto dangų funkcionavimą atsparumo temperatūriniais plyšiams aspektu. Atsižvelgiant į valkšnumo modulio ir jo kitimo rodiklio vertes pagal temperatūrinių plyšių susidarymo tikimybę išskirtos trys zonos. Pastebėta, kad kuo didesnis asfalto mišinio

valkšnumo modulis arba kuo mažesnė valkšnumo modulio kitimo rodiklio vertė, tuo labiau tikėtina, kad asfalto dangoje pasireikš temperatūriniai plyšiai.

Sukūrus irimo mechanika paremtus asfalto mišinių tyrimų metodus, mokslininkai pradėjo ieškoti ribinių irimo energijos  $G_f$  ir įtempių intensyvumo koeficiento  $K_{Ic}$  verčių, apibrėžiančių asfalto dangų atsparumą temperatūriniams plyšiams. Šiam tikslui Jungtinėse Amerikos Valstijose buvo atliktas išsamus dviejų etapų mokslinis tyrimas, kurio metu analizuotas tiriamuosiuose kelių ruožuose susidaręs temperatūrinių plyšių intensyvumas ir SCB bei DC(T) bandymais nustatytos iš šių ruožų paimtų viršutinio asfalto dangos sluoksnio gręžtinių ėminių (kernų) charakteristikos. Remiantis atlikto tyrimo rezultatais nustatyta, jog siekiant apriboti temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose, asfalto mišinio irimo energija  $G_f$ , nustatyta SCB bandymu esant 10 °C aukštesnei temperatūrai nei pagal PG reikalavimus nustatyta bitumo žemiausia kritinė temperatūra, turi būti ne mažesnė nei 350 J/m<sup>2</sup>. Kadangi kriterijaus nustatymui taikyti iš tam tikrą laikotarpį eksploatuotų kelių ruožų paimti gręžtiniai ėminiai, t. y. tirtieji asfalto bandiniai buvo paveikti dangos eksploatacijos metu vykstančių senėjimo procesų, ir nustatyta kriterijaus vertė bus taikoma laboratorijoje suformuotiems bandiniams tirti, tai siekiant eliminuoti tiriamuosiuose ruožuose vykstančio asfalto dangos senėjimo įtaką apibrėžtai kriterijaus vertei, tyrimo metu nustatytas kriterijus buvo padidintas iki 400 J/m<sup>2</sup>. Taip pat nustatytas įtempių intensyvumo koeficiento  $K_{Ic}$  kriterijus ( $\geq 800 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ), tačiau pastarasis taikytinas tik kaip papildomas rodiklis ir neatlikti jokie šio rodiklio tikslinimai, įvertinantys tiriamųjų ruožų asfalto dangos amžiaus įtaką nustatytai kriterijaus vertei (Marasteanu *et al.* 2012).

To paties Jungtinėse Amerikos Valstijose atlikto tyrimo metu nustatyta, jog asfalto mišinio irimo energija  $G_f$ , gauta DC(T) bandymu esant 10 °C aukštesnei temperatūrai nei pagal PG reikalavimus nustatyta bitumo žemiausia kritinė temperatūra, turi būti ne mažesnė kaip 400 J/m<sup>2</sup>. Esant mažesnės svarbos objektams gali būti taikomas 350–400 J/m<sup>2</sup> reikalavimas. Tuo tarpu esant itin svarbiems objektams, kur keliami griežti reikalavimai dangos lygumui, irimo energija  $G_f$  turi būti ne mažesnė kaip 600 J/m<sup>2</sup>. Kadangi kriterijaus nustatymui taikyti iš tam tikrą laikotarpį eksploatuotų kelių ruožų paimti gręžtiniai ėminiai, t. y. tirtieji asfalto bandiniai buvo paveikti dangos eksploatacijos metu vykstančių senėjimo procesų, ir nustatyta kriterijaus vertė bus taikoma laboratorijoje suformuotiems bandiniams tirti, tai siekiant eliminuoti tiriamuosiuose ruožuose vykstančio asfalto dangos senėjimo įtaką apibrėžtoms kriterijų vertėms, tyrimo metu nustatyti kriterijai padidinti 15 %. Vadinas, asfalto dangos atsparumo temperatūriniams plyšiams aspektu, asfalto mišinio, taikytino automobilių keliams, kur ekvivalentinių standartinių (10 t svorio) ašių apkrovų bendra suma (ESAs) per numatytą projektinį naudojimo laikotarpį yra mažesnė nei 10 mln., asfalto mišinio irimo energija  $G_f$  turi būti ne mažesnė nei 400 J/m<sup>2</sup>; kur ESAs kinta nuo 10 mln. iki 30 mln.,

irimo energija  $G_f$  turi būti ne mažesnė nei  $460 \text{ J/m}^2$ ; kur ESAs viršija 30 mln., irimo energija  $G_f$  turi būti ne mažesnė nei  $690 \text{ J/m}^2$  (Marasteanu *et al.* 2012).

Kelių tiesyboje asfalto mišinio atsparumas temperatūriniais plyšiams vertinamas taikant 1.2 lentelėje pateiktus kriterijus ir jų ribines vertes bei sąlygas.

**1.2 lentelė.** Kriterijų ribinės vertės skirtos vertinti asfalto mišinių atsparumą temperatūriniais plyšiams

**Table 1.2.** Limiting criteria for asphalt mixture resistance to low temperature cracking

Kriterijus	Ribinė vertė (sąlyga) <sup>1)</sup>	Tyrimo metodas	Literatūros šaltinis
1	2	3	4
Standis po 180 s	$\leq 10 \text{ GPa}$		Deme, Young 1987
Žemiausia kritinė temperatūra, kuriai esant suyra bandinys	$< \text{nei žemiausia dangos paviršiaus temperatūra}$	TSRST bandymas	Jung, Vinson 1994
Žemiausia kritinė temperatūra	$< \text{nei žemiausia dangos paviršiaus temperatūra}$	IDT valkšnumo ir stiprio bandymai	Vinson <i>et al.</i> 1989, Lytton <i>et al.</i> 1993
Valkšnumo modulis ir jo kitimo rodiklis po 60 s <sup>2)</sup>	dešiniau nei speciali kreivė	BBR bandymas	Jones <i>et al.</i> 2014
Irimo energija $G_f$ <sup>2)</sup>	$\geq 400 \text{ J/m}^2$	SCB bandymas	Marasteanu <i>et al.</i> 2012
Įtempių intensyvumo koeficientas $K_{IC}$ <sup>2)</sup>	$\geq 800 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{0.5}$	SCB bandymas	Marasteanu <i>et al.</i> 2012
Irimo energija $G_f$ <sup>2)</sup>	$\geq 400 \text{ J/m}^2$ $\geq 460 \text{ J/m}^2$ $\geq 690 \text{ J/m}^2$	DC(T) bandymas	Marasteanu <i>et al.</i> 2012
Žemiausia kritinė temperatūra	$< \text{nei žemiausia dangos paviršiaus temperatūra}$	AACD bandymas	Kim <i>et al.</i> 2010
Žemiausia kritinė temperatūra	$< \text{nei žemiausia dangos paviršiaus temperatūra}$	akustinė emisija	Buttlar <i>et al.</i> 2011

Pastabos: <sup>1)</sup> – jei bitumas tenkina pateiktą ribinę vertę (sąlygą), tai jis yra atsparus temperatūriniais plyšiams

<sup>2)</sup> – žemiausia kritinė temperatūra laikoma  $10^\circ \text{C}$  sumažinta bandymo metu nustatyta kritinė temperatūra ( $T_{\text{cr, bandymo}} - 10^\circ \text{C}$ )

Asfalto mišinys esant tam tikrai temperatūrai laikomas atspariu temperatūriams plyšiams, jei tenkinama bent vieno 1.2 lentelėje pateikto kriterijaus ribinė vertė arba sąlyga. 1.2 lentelėje pateiktų kriterijų ribinės vertės ir sąlygos įprastai taikomos nustatyti asfalto mišinio žemiausią kritinę temperatūrą. Ši temperatūra apibrėžiama kaip žemiausia dangos paviršiaus temperatūra, kuriai esant asfalto mišinys atlaiko susidariusius temperatūrinius įtempius, t. y. asfalto dangoje nesudaro temperatūriniai plyšiai.

## 1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Bitumo ir (arba) asfalto mišinio tyrimų neigiamose temperatūrose metodai imituoja temperatūrinių plyšių susidarymą dėl vienkartinės kritinės temperatūros poveikio. Asfalto dangos eksploatacijos metu neviršijant šios temperatūros išvengiama temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi. Mokslininkų darbuose bitumo ir (arba) asfalto dangų trūkimas (plyšimas) dėl ciklinio temperatūrų poveikio laboratorijoje beveik netyrinėjamas dėl šių plyšių formavimosi sudėtingumo.
2. Bitumo ir (arba) asfalto mišinio funkcionavimo žemoje kritinėje temperatūroje įvertinimas apriboja temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangoje.
3. Išanalizavus mokslines publikacijas apie bitumo ir (arba) asfalto mišinio atsparumo temperatūriniais plyšiams vertinimą išskirti pagrindiniai tyrimo metodo pasirinkimą apsprendžiantys veiksniai: nustatomos bitumo ir (arba) asfalto mišinio charakteristikos koreliacija su asfalto dangoje atsiveriančių temperatūrinių plyšių intensyvumu, gaunamų rezultatų pakartojamumas ir atkuriamumas, bandymo trukmė, bandinio geometrija ir bandinio dydis. Tiriant bitumus svarbu, kad taikomas tyrimo metodas būtų tinkamas tirti tiek nemodifikuotų, tiek ir modifikuotų bitumų funkcionavimą.
4. Apibendrinant atliktą bitumo ir asfalto mišinių tyrimo metodų ir kriterijų, apibrėžiančių temperatūrinių plyšių susidarymą asfalto dangoje, analizę pabrėžtina, kad bitumo įtempių relaksacijos modulio, nustatomo dinamiiniu šlyties reometru su 4 mm skersmens bandiniu, visuotinas taikymas vertinti asfalto dangų atsparumą temperatūriniais plyšiams leistų charakterizuoti bitumo elgseną visoje eksploatacinių temperatūrų apimtyje naudojant vieną prietaisą – dinaminį šlyties reometrą. Be to, bandinio formavimui būtų reikalingas itin mažas bitumo kiekis (25 mg), kas itin pageidautina tiriant sendintus ir (arba) iš eksploatuojamų kelių regeneruotus bitumus.

Atsižvelgiant į mokslinės literatūros analizės išvadas, bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinių sąlygų nustatymui temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu, sukūrimui būtina išspręsti šiuos uždavinius:

1. Sukurti teorinį asfalto dangų atsparumą temperatūriniams plyšiams įvertinantį algoritmą, pagrįstą tiesioginiu bitumo įtempių relaksacijos modulio nustatymu dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens bandiniu.
2. Nustatyti bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribas atliekant bitumo įtempių relaksacijos bandymus neigiamose temperatūrose.
3. Nustatyti temperatūrinių plyšių intensyvumą pasirinktuose automobilių kelių ruožuose ir atlikti iš šių ruožų asfalto viršutinio sluoksnio regeneruoto bitumo bandymus dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens bandiniais atsižvelgiant į tiriamųjų ruožų eksploatacijos laikotarpiu nustatytą žemiausią asfalto dangos paviršiaus temperatūrą.
4. Pateikti sukurto algoritmo taikymo gaires (principus) asfalto dangos viršutinio sluoksnio mišinio gamybai naudotino bitumo parinkimui atsižvelgiant į žemiausią asfalto dangos temperatūrą.
5. Apskaičiuoti bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo taikymo ekonominį efektą lyginant su įprastai taikoma bitumo parinkimo metodika.





---

## **Teorinis algoritmas asfalto dangų atsparumui temperatūriniams plyšiams vertinti ir eksperimentinis tyrimas jo validacijai**

Šiame skyriuje sukuriamas teorinis algoritmas vertinti asfalto dangų atsparumą temperatūriniams plyšiams ir atliekamas eksperimentinis tyrimas jo validacijai. Analizuojamas temperatūrinių plyšių intensyvumas Lietuvos automobilių kelių su asfalto danga ruožuose priklausomai nuo dangos amžiaus ir bitumo rūšies bei šių ruožų asfalto dangos paviršiuje užfiksuotos žemiausios (kritinės) temperatūros. Taip pat tiriamos iš tiriamųjų kelių ruožų asfalto viršutinio sluoksnio regeneruoto bitumo savybės (tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos, įtempių relaksacijos modulis ir jo kitimo rodiklis) neigiamose temperatūrose. Pateiktas eksperimentinio tyrimo planas ir metodika bei tyrimo rezultatai.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta vienoje autorės mokslinėje publikacijoje Gražulytė *et al.* (2019).

## 2.1. Teorinis algoritmas vertinti asfalto dangų atsparumą temperatūriniais plyšiams

Temperatūrinių plyšių susidarymas ir vystymasis asfalto dangose apribojamas tiriant bitumo ir (arba) asfalto mišinio funkcionavimą neigiamoje temperatūroje bei taikant moksliniais tyrimai grįstus kriterijus, apibrėžiančius bitumo ir (arba) asfalto mišinio atsparumą temperatūriniais plyšiams. Asfalto mišinių tyrimas yra ekonomiškai neefektyvus lyginant su bitumo tyrimais, nes pastarieji yra mažiau imlūs laikui, bandinių gamybai reikalingas ženkliai mažesnis medžiagų kiekis bei nereikalinga papildoma įranga bandinių paruošimui (pvz. tankintuvas, gilzės). Todėl temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose tikslinga valdyti tiriant asfalto mišinio gamybai taikytiną bitumą ir tik nesant patikimų bitumo tyrimo metodų ir kriterijų, apibrėžiančių temperatūrinių plyšių susidarymą, taikyti asfalto mišinio tyrimo metodus ir kriterijus.

4-mm DSR bandymas išskirtinas kaip vienas iš perspektyviausių bitumo tyrimo metodų neigiamose temperatūrose. Pagrindinis šio tyrimo metodo privalumas – itin mažas bitumo kiekis (25 mg) reikalingas vienam bandiniui paruošti. Tai ypač svarbu tiriant sendintą arba iš eksploatuojamų kelių ruožų regeneruotą bitumą, nes tokiu atveju tiriamojo bitumo gavimui reikalingas ženkliai mažesnis sendinamo bitumo kiekis arba asfalto dangos gręžtinių ėminių (kernų) skaičius. Pabrėžtina, kad kuo mažiau pažeidžiama asfalto danga jos eksploatacijos metu, tuo didesnė tikimybė, kad bus užtikrintas dangos funkcionavimas be struktūrinių pažeidimų visu jos projektiniu naudojimo laikotarpiu. Be to, 4-mm DSR bandymas yra universalus bitumo tyrimo metodas, nes bandymus galima atlikti esant plačiam temperatūros, dažnio, įtempių arba deformacijų diapozonui. Šio metodo visuotinis taikymas įgalintų bitumo elgsenos charakterizavimą esant aukštai, vidutinei ir žemai aplinkos temperatūrai taikant vieną prietaisą – dinaminį šlyties reometrą, kadangi jis jau naudojamas tirti bitumo funkcionavimą esant aukštai ( $\geq 46$  °C) ir vidutinei (nuo 4 °C iki 40 °C) temperatūrai atitinkamai taikant 25 mm ir 8 mm skersmens bandinius.

Tačiau taikant 4-mm DSR bandymą mokslininkai susiduria su tam tikrais iššūkiais, pavyzdžiui, bandymo temperatūros užtikrinimu bandinyje, itin mažo skersmens (4 mm) bandinio paruošimu, bandinio padėjimu tarp plokštelių taip, kad bandinys būtų joms lygiagretus ir kt. Visa tai lemia diskusiją dėl 4-mm DSR bandymo rezultatų pakartojamumo ir atkartojamumo. Pirmą kartą 4-mm DSR bandymo rezultatų pakartojamumą analizavo Sui *et al.* (2010) lyginant kompleksinio šlyties modulio kompleksines kreives. Iš viso buvo sudarytos keturios kompleksinio šlyties modulio kompleksinės kreivės esant 25 °C referencinei temperatūrai (bandymai dinaminio šlyties reometru atlikti nuo 30 °C iki –40 °C). Kiekviena kompleksinio šlyties modulio kompleksinė kreivė atspindėjo vienos dienos matavimų duomenis. Sudarytos kompleksinio šlyties modulio kompleksinės kreivės palygintos tarpusavyje

grafiškai ir skaitine verte lyginant tam tikrus parametrus, nustatytus iš sudarytų kompleksinių kreivių. Analizė parodė, kad kreivės grafiškai sutampa ir analizuojami parametrai kinta neženkiai. Vadinasi, 4-mm DSR bandymų rezultatai yra patikimi. Mokslininkai taip pat palygino dinaminio šlyties reometru su skirtingo skersmens bandiniais gautus bandymų rezultatus ir 4-mm DSR bandymų rezultatus su BBR bandymu gautais rezultatais. Analizės metu abiem atvejais nenustatyta reikšmingų nuokrypių tarp bandymų rezultatų.

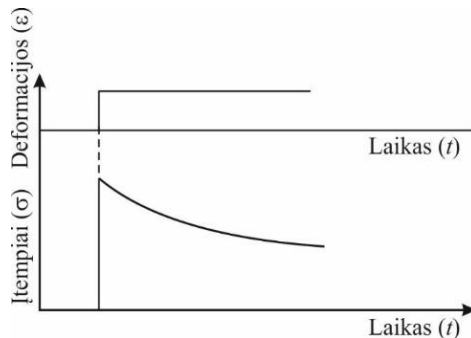
Apie 4-mm DSR rezultatų atkuriamumo tyrimą, kuriame lyginti skirtingose laboratorijose gauti rezultatai, užsimenama 2013–2016 m. publikacijose (Farrar *et al.* 2013, 2016), tačiau iki šiol vis dar nėra viešai paskelbta šio tyrimo rezultatų. Gražulytė *et al.* (2019) analizavo 4-mm DSR rezultatų pakartojamumą ir atkuriamumą tiriant keturis skirtingus bitumus, iš kurių vienas – polimerais modifikuotas bitumas, esant penkioms skirtingoms temperatūroms (0 °C, –6 °C, –12 °C, –18 °C ir –24 °C) ir dažniui kintant nuo 10 Hz iki 0,01 Hz. Kiekvienas bitumas esant toms pačioms bandymo sąlygoms tirtas 3 kartus. Šio tyrimo rezultatai parodė, kad 4-mm DSR bandymas pasižymi dideliu pakartojamumu (variacijos koeficientas < 5 %), tačiau bandymo rezultatai varijuoja priklausomai nuo bitumo rūšies, bandymo temperatūros ir dažnio. Mažiausias pakartojamumas nustatytas tiriant minkščiausią bitumą (160/220) žemiausioje bandymo temperatūroje (–24 °C) arba esant mažiausiam dažniui (0,01 Hz). 4-mm DSR bandymo rezultatų atkuriamumas įvertintas palyginus bandymų rezultatus tarp dviejų laboratorijų. Nustatyta, kad 4-mm DSR bandymo rezultatų atkuriamumas tenkina standarto LST EN 14770:2012 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo nustatymas. Dinaminis šlyties reometras (DSR)“ reikalavimus atkuriamumui, kuomet bandymai atliekami taikant 8 mm arba 25 mm skersmens bandinius.

4-mm DSR metodo teikiami privalumai ir užtikrintas rezultatų patikimumas ir atkartojamumas grindžia jo taikymo pranašumą lyginant su kitais bitumo tyrimo metodais, apibrėžiančiais temperatūrinių plyšių susidarymą. Tačiau Sui *et al.* (2011) pasiūlyta bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio nustatymo metodika remiasi netiesioginiu charakteristikų nustatymu, t. y. pirmiausiai 4-mm DSR bandymu nustatomas bitumo kaupiamasis modulis esant skirtingoms temperatūroms ir dažniams; tuomet remiantis gautais rezultatais sudaroma kaupiamojo modulio kompleksinė kreivė, kuri galiausiai perskaičiuojama (interkonvertuojama) į bitumo įtempių relaksacijos modulio kompleksinę kreivę, iš kurios nustatoma bitumo įtempių relaksacijos modulio vertė ir jo kitimo rodiklis po 60 s. Rinkoje esantys dinaminiai šlyties reometrai geba akimirksniu bandiniui suteikti pageidaujamas deformacijas jas išlaikant numatytą laikotarpį. Vadinasi, bitumo įtempių relaksacijos modulis gali būti nustatomas tiesiogiai. Todėl tikslinga sukaupą patirtį atliekant 4-mm DSR bandymus neigiamose temperatūrose pritaikyti bitumo įtempių relaksacijos bandymo atlikimui.

Įtempių relaksacijos bandymo metu nustatoma tiriamosios medžiagos reakcija į ją veikiančias tam tikro dydžio pastovias deformacijas. 2.1 paveiksle pateikiama tiesiškai tampriai klampios elgsenos medžiagos įtempių relaksacijos koncepcija. Pabrėžtina, kad bitumas priskiriamas būtent tokiai medžiagai. Tiesiškai tampriai klampios elgsenos medžiagai akimirksniu suteikus tam tikro dydžio deformacijas, tos medžiagos įtempiai pradiniu laiko momentu yra proporcingi suteiktoms deformacijoms ir palaipsniui mažėja laike, nors deformacijos nekinta. Medžiagos reakcija į ją veikiančias tam tikro dydžio pastovias deformacijas apibūdinama įtempių relaksacijos modulių, kuris apskaičiuojamas taikant 2.1 formulę (Tschoegl 1989):

$$G(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon}, \quad (2.1)$$

čia  $G(t)$  – bitumo įtempių relaksacijos modulis laiko momentu  $t$ , MPa;  $\sigma(t)$  – įtempiai bandinyje laiko momentu  $t$ , MPa;  $\varepsilon$  – bandiniui suteiktos pastoviosios deformacijos.

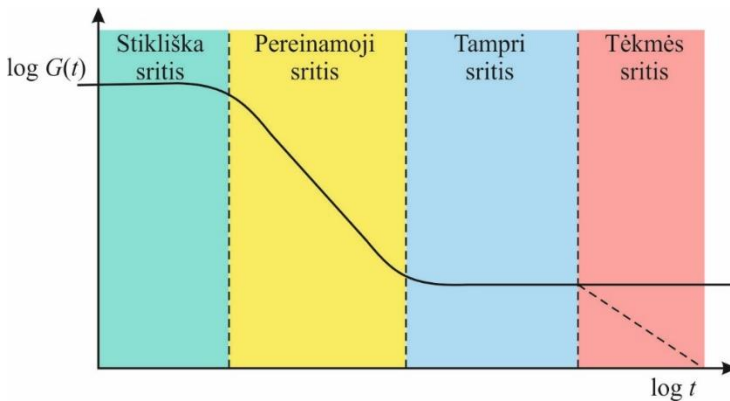


**2.1 pav.** Tiesiškai tampriai klampios elgsenos medžiagos įtempių relaksacijos koncepcija

**Fig. 2.1.** Concept of linear viscoelastic material stress relaxation

Įtempių relaksacijos modulio kitimo principinė schema pateikiama 2.2 paveiksle. Deformacijų suteikimo momento pradžioje (apytiksliai iki 0,001 s arba dar ankstesnio momento) medžiaga yra stikliškoje srityje (angl. *glassy region*) ir pasižymi didžiausia įtempių relaksacijos modulio verte. Pastaroji nekinta laike. Po to medžiaga pereina į pereinamąją sritį (angl. *transition region*), kurioje elgiasi kaip tampriai klampi medžiaga. Šioje būsenoje medžiagos įtempių relaksacijos modulio vertė palaipsniui mažėja laike. Vis dar toliau medžiagą veikiant tomis pačiomis deformacijomis ji pereina į tamprią sritį (angl. *rubbery region*), kurioje elgiasi kaip guma. Šioje srityje tinklinės struktūros (angl. *cross-linked*) medžiaga pasižymi ma-

žiausia įtempių relaksacijos modulio vertė ir ji nebekinta laike, t. y. nusistovi pusiausvyra. Tuo tarpu, jei medžiaga nėra tinklinės struktūros (dauguma termoplastikų), ji iš tamprios srities pereina į tėkmės sritį (angl. *flow state*), t. y. įtempių relaksacijos modulio vertė toliau mažėja (Ward, Sweeney 2012). Eksperimentinių tyrimų metu neįmanoma nustatyti įtempių relaksacijos modulio visose srityse. Įprastai bandymais nustatomas medžiagos įtempių relaksacijos modulio kitimas pereinamojoje srityje, t. y. kai medžiaga elgiasi kaip tampriai klampi medžiaga. Būtent šioje srityje tikslinga atlikti bitumo įtempių relaksacijos bandymus su 4-mm DSR.



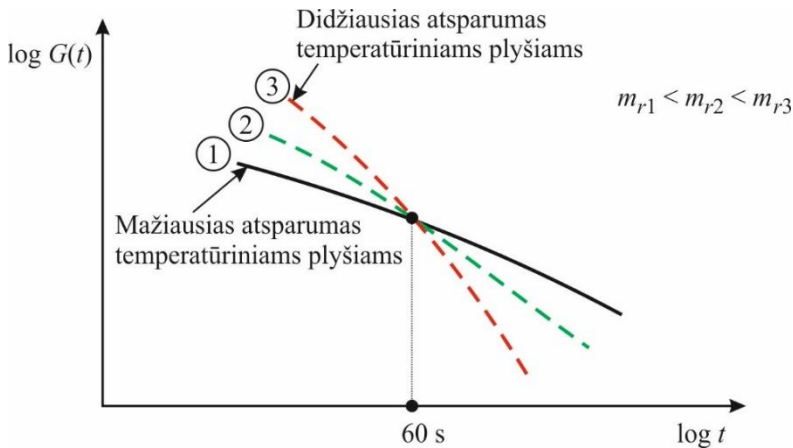
**2.2 pav.** Įtempių relaksacijos modulio kitimo principinė schema (Ward, Sweeney 2012)

**Fig. 2.2.** Principal scheme of stress relaxation modulus dependency on time (Ward, Sweeney 2012)

Atsparumo temperatūriniais plyšiams aspektu svarbu apriboti bitumo įtempių relaksacijos modulio vertę, kad ji nebūtų per didelė, t. y. kad bitume nesusidarytų per dideli įtempiai. Kuo bitumo įtempiai didesni, tuo bitumas kietesnis ir trapesnis neigiamoje temperatūroje, o tai nėra pageidaujama bitumo savybė atsparumo temperatūriniais plyšiams aspektu. Be to, vien tik įtempių relaksacijos moduliui negalima visapusiškai charakterizuoti bitumo funkcionavimo, nes esant tai pačiai bitumo įtempių relaksacijos modulio vertei bitumas gali visiškai skirtingai funkcionuoti, t. y. pasižymėti skirtingu įtempių relaksacijos modulio kitimo greičiu (2.3 pav.). Atsparumo temperatūriniais plyšiams aspektu svarbu, kad bitume susidarę įtempiai kuo greičiau nusloptų (sumažėtų), t. y. kad bitumo įtempių relaksacijos modulio vertė kuo greičiau mažėtų. Vadinasi, pageidautina, kad bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo laike kreivė būtų kuo statesnė. Bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimas apibūdinamas kitimo rodikliu. Tai bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo funkcijos liestinė apskaičiuojama taikant 2.2 formulę (Farrar *et al.* 2015):

$$m_r(t) = \left| \frac{d \log G(t)}{d \log(t)} \right| = |A \times 2 \times \log(t) + B|, \quad (2.2)$$

čia  $m_r(t)$  – bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklis laiko momentu  $t$ ;  $G(t)$  – bitumo įtempių relaksacijos modulis laiko momentu  $t$ , MPa;  $A$  ir  $B$  – bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo funkcijos regresijos koeficientai.



**2.3 pav.** Įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklio samprata  
**Fig. 2.3.** Concept of stress relaxation modulus slope

Taikomų bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinių verčių koreliacija su faktiniu asfalto dangoje atsiveriančių temperatūrinių plyšių intensyvumu yra abejotina ir diskutuotina, nes Sui *et al.* (2011), Farrar *et al.* (2015) ir Riccardi *et al.* (2017b) pasiūlytos bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinės vertės yra paremtos ribinėmis lenkimo standžio ir jo kitimo rodiklio (BBR bandymas) vertėmis (1.2.4 skirsnis), kurios nustatytos XX a. pabaigoje analizuojant nemodifikuotus bitumus. XXI a. kelių tiesyboje gaminant asfalto mišinius, ypač asfalto viršutiniam sluoksniui, kuris pasižymi didžiausiu jautrumu temperatūrinių plyšių susidarymui, dažniausiai naudojami modifikuoti bitumai. XX a. pabaigoje nustatant ribines lenkimo standžio ir jo kitimo rodiklio vertes modifikuoti bitumai nebuvo įvertinti, nes jų nebuvo rinkoje arba jų taikymas buvo minimalus. Moksliniai tyrimai rodo, kad lenkimo standžio ir jo kitimo rodiklio ribinių verčių taikymas tiriant polimerais modifikuotus bitumus dažnai neapsaugo asfalto dangų nuo temperatūrinių plyšių susidarymo (Dongré *et al.* 1997; Kluttz, Dongré 1997; Bouldin *et al.* 1999; Hesp 2004; Iliuta *et al.* 2004; Hesp *et al.* 2009a, 2009b). Todėl lenkimo standžio ir jo kitimo rodiklio ribinių verčių taikymas bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio

ribinių verčių nustatymui nėra tinkamas. Visa tai grindžia, faktiniu asfalto dangų funkcionavimu grįstų bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinių verčių nustatymo poreikį. Pabrėžtina, jog tikslinga bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribines vertes apibrėžti ties 60 s laiko momentu esant 10 °C aukštesnei temperatūrai nei žemiausia asfalto dangos temperatūra, užfiksuota numatytoje bitumo taikymo vietovėje per paskutinių 10–30 metų laikotarpį. Toks temperatūros padidinimas lemia bandymų atlikimą aukštesnėje temperatūroje, kas remiantis Gražulytė *et al.* (2019) atliktais tyrimais teigiamai atsiliepia bandymo rezultatų pakartojamumui ir atkuriamumui.

Atsižvelgiant į pirmame skyriuje atliktą literatūros analizę ir bitumo įtempių relaksacijos bandymo su 4-mm DSR pranašumą lyginant su kitais bitumo tyrimo metodais, apibrėžiančiais temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose, bei šiame skyriuje išdėstytas nuostatas, sukurtas teorinis bitumo įtempių relaksacijos moduliui ir jo kitimo rodikliui pagrįstas algoritmas asfalto dangų atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti. Algoritmą sudaro šie žingsniai:

1. Tiriamojo bitumo pasirinkimas.
2. Bitumo sendinimas pagal standartų LST EN 12607–1:2015 ir LST EN 14769:2012 reikalavimus.
3. Pasiruošimas bandymų atlikimui dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens bandiniu (temperatūros tarp plokštelių patikrinimas (kalibravimas), radialiojo koeficiento nustatymas, motoro ir matavimo sistemos inercijos nustatymas).
4. Tiriamojo bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymas.
5. Tiesioginis bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio nustatymas atliekant bitumo įtempių relaksacijos bandymą ne mažiau kaip dvejose neigiamose temperatūrose.
6. Tiriamojo bitumo kritinės temperatūros nustatymas pagal bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribines sąlygas.
7. Tiriamojo bitumo žemiausios kritinės temperatūros nustatymas.
8. Nustatytos žemiausios kritinės temperatūros tikrinimas ar ji yra ne aukštesnė nei žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra, užfiksuota numatytoje bitumo taikymo vietovės regione, ar ne.

Jeigu nustatoma, kad tiriamojo bitumo žemiausia kritinė temperatūra yra aukštesnė nei žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra, užfiksuota numatytame bitumo taikymo vietovės regione, tuomet laikoma, kad tiriamasis bitumas nėra atsparus temperatūrinių plyšių susidarymui. Tokio bitumo taikymas asfalto mišinio gamybai lemia temperatūrinių plyšių susidarymą asfalto dangoje. Todėl siekiant apriboti temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose, turi būti grįžtama į pirmą algoritmo žingsnį, kuriame pasirenkamas kitas tiriamasis bitumas ir kartojami visi algoritmo žingsniai iš naujo. Jeigu 8-ajame algoritmo

žingsnyje nustatoma, kad žemiausia kritinė temperatūra yra žemesnė nei žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra, užfiksuota numatytame bitumo taikymo vietovės regione, tuomet laikoma, kad tiriamasis bitumas yra atsparus temperatūrinių plyšių susidarymui. Tokio bitumo taikymas asfalto mišinio gamybai lemia asfalto dangos funkcionavimą be temperatūrinių plyšių.

Sukurto algoritmo veikimui būtina nustatyti bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribines sąlygas, pagrįstas faktiniu eksploatuojamų kelių funkcionavimu temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu. Taip pat nustatant ribines sąlygas būtina įvertinti kelių eksploatavimo metu užfiksuotą žemiausią asfalto dangos paviršiaus temperatūrą.

## 2.2. Eksperimentinio tyrimo planas

Siekiant nustatyti bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribines sąlygas, apibrėžiančias temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose, ir patikslinti 2.1 poskyryje sukurtą teorinį algoritmą asfalto dangų atsparumui temperatūriniams plyšiams vertinti, atliktas eksperimentinis tyrimas. Eksperimentiniam tyrimui atlikti pasitelkta Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos fakulteto Kelių tyrimo instituto Automobilių kelių mokslo laboratorijos įranga.

Eksperimentiniam tyrimui atrinkti 26-i charakteringi Lietuvos kelių ruožai, kurie yra naujai įrengti arba kuriuose rekonstravimo metu buvo pakeisti visi asfalto sluoksniai. Tokiu būdu užtikrinta, kad dangoje susidarę plyšiai nėra susiformavę dėl sename asfalto apatiniame sluoksnyje arba asfalto pagrindo sluoksnyje esančių plyšių atsikartojimo naujai paklotame asfalto viršutiniame sluoksnyje. Parenkant tiriamuosius kelių ruožus atsižvelgta į:

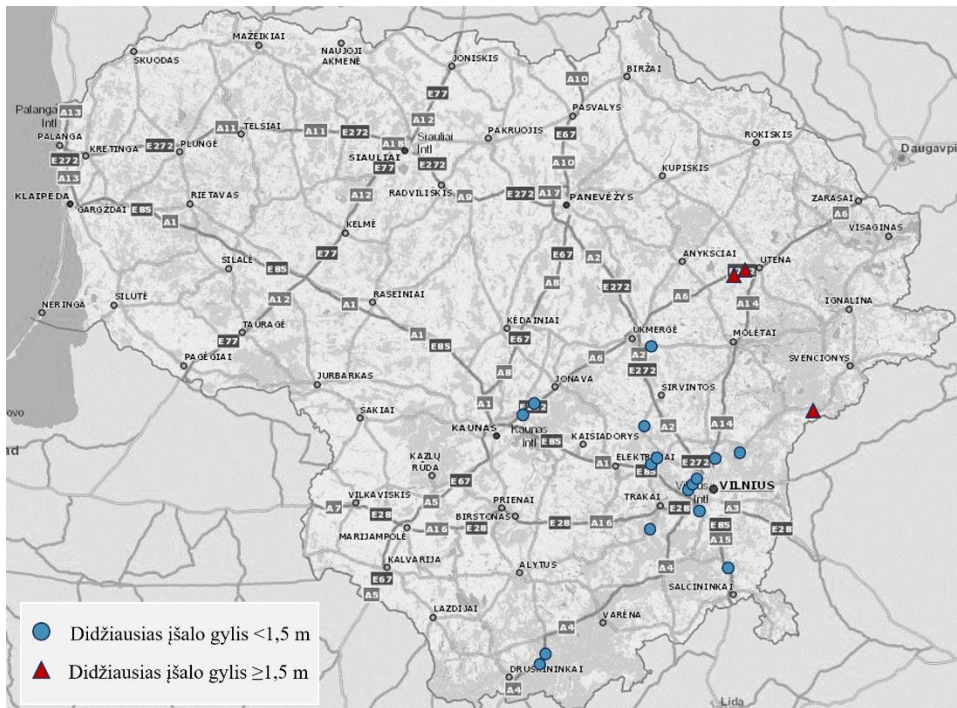
- kelio reikšmę (siektą, kad atrinktuose keliuose būtų valstybinės reikšmės magistraliniai ir krašto keliai bei Vilniaus vakarinis aplinkkelis);
- temperatūrinių plyšių intensyvumą (siektą, kad atrinktuose kelių ruožuose būtų tokių kelių ruožų, kuriuose vyrauja temperatūriniai plyšiai ir kuriuose jie nepasireiškė);
- dangos amžių (siektą, kad atrinktuose kelių ruožuose danga būtų eksploatuojama ne daugiau kaip 12 metų);
- asfalto dangos viršutiniame sluoksniui taikytą bitumą (siektą, kad atrinktuose kelių ruožuose būtų taikytas skirtingas bituminis rišiklis);
- geografinę padėtį (siektą, kad bent trijuose kelių ruožuose didžiausias įšalo gylis būtų didesnis nei 1,5 m vadovaujantis KPT SDK 19 2 priedu).

Eksperimentiniam tyrimui atrinkti kelių ruožai pateikti 2.4 paveiksle. A priede pateiktas tiriamųjų kelių ruožų sąrašas, kuriame nurodyta:

- tiriamojo kelio ruožo numeris;



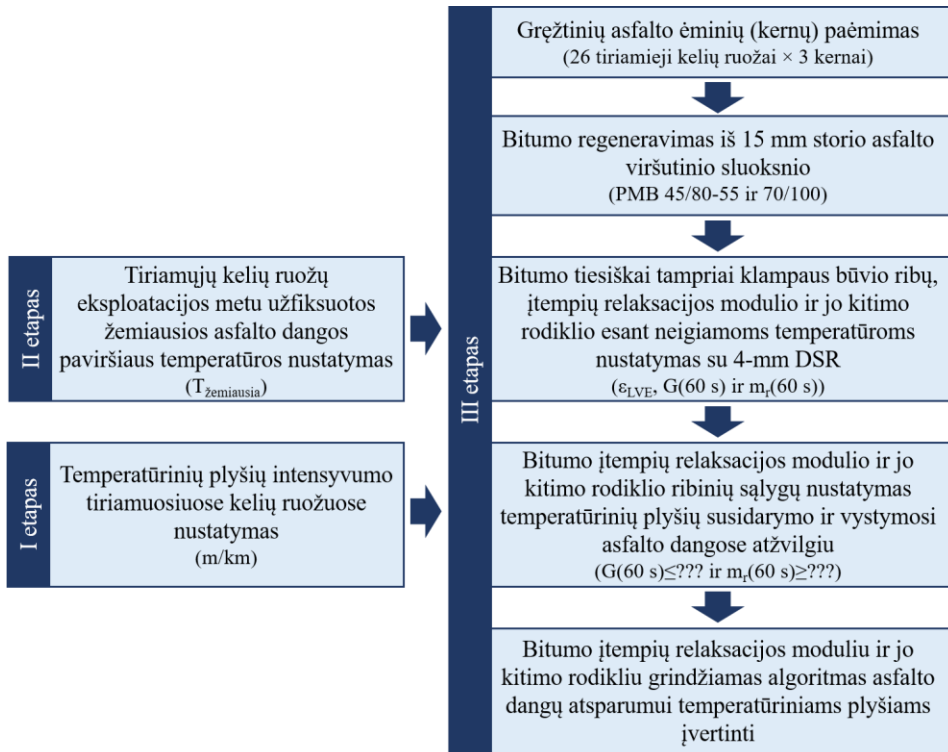
- kelio numeris;
- kelio pavadinimas;
- kelio ruožo pradžia ir pabaiga;
- kelio ruožo ilgis;
- kelio ruožo kryptis (ypač aktualu keliuose su skiriamąja juosta);
- kelio ruožo įrengimo arba rekonstravimo metai;
- asfalto viršutiniam sluoksniui įrengti taikyto asfalto mišinio rūšis ir tipas;
- bitumo, naudoto pagaminti asfalto viršutinio sluoksnio mišinį, rūšis.



**2.4 pav.** Eksperimentiniam tyrimui pasirinkti tiriamieji kelių ruožai

**Fig. 2.4.** Road sections selected for experimental research

Eksperimentinio tyrimo vykdymo schema pateikta 2.5 paveiksle. Išskirti trys etapai. Pirmojo etapo metu tiriamuosiuose kelių ruožuose 2017 m. rudenį ir 2018 m. pavasarį nustatytas temperatūrinis plyšių intensyvumas ir atstumas tarp jų pagal 2.3.1 skirsnyje aprašytą metodiką.



**2.5 pav.** Eksperimentinio tyrimo vykdymo schema

**Fig. 2.5.** Scheme of the experimental research

Antrojo etapo metu pagal 2.3.2 skirsnyje aprašytą metodiką nustatyta tiriamųjų kelių ruožų eksploatacijos metu užfiksuota žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra, kuri remiantis 1.1 poskyriu buvo kritinė ir lėmė temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangoje.

Trečiojo etapo metu iš tiriamųjų kelių ruožų pagal 2.3.3 skirsnyje aprašytą metodiką paimti gręžtiniai asfalto ėminiai (kernai) ir pagal 2.3.4 skirsnyje aprašytą metodiką atliktas bituminio rišiklio regeneravimas iš 15 mm storio viršutinio asfalto dangos sluoksnio. Regeneruotiems bitumams tiesiogiai dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens plokštelėmis atsižvelgiant į antrojo etapo metu nustatytas žemiausias asfalto dangos temperatūras bitumo tiesiškai tampriai klampiame būvyje pagal 2.3.5 skirsnyje aprašytą metodiką nustatytas bitumo įtempių relaksacijos modulis ir jo kitimo rodiklis. Remiantis gautomis bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio vertėmis po 60 s bei pirmojo etapo metu nustatytu temperatūrinių plyšių intensyvumu, nustatytos bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinės sąlygos, apribojančios temperatūrinių plyšių susidarymą

ir vystymąsi asfalto dangose. Įvertinus gautas ribines sąlygas patikslintas 2.1 poskyryje pateiktas teorinis algoritmas asfalto dangų atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti. Galutinis bitumo įtempių relaksacijos moduliui ir jo kitimo rodikliu grindžiamas algoritmas užtikrina asfalto dangų atsparumą temperatūrinių plyšių susidarymui ir vystymuisi. Taip pat apskaičiuotas šio algoritmo taikymo ekonominis efektas lyginant su įprastai taikoma bitumo parinkimo metodika.

## **2.3. Eksperimentinio tyrimo metodika**

### **2.3.1. Temperatūrinių plyšių intensyvumo tiriamuosiuose kelių ruožuose nustatymas**

Temperatūrinių plyšių intensyvumas tiriamuosiuose kelių ruožuose nustatytas 2017 m. rudenį ir 2018 m. pavasarį vykstant į objektą ir registruojant asfalto dangos paviršiuje matomus temperatūrinius plyšius registravimo formoje nurodant plyšio ilgį ir atstumą tarp gretimų plyšių ir (arba) tiriamojo ruožo pradžios arba pabaigos. Temperatūriniais plyšiams priskirti statmenai kelio ašiai susidarę dangos trūkiai (plyšiai). Minimalus plyšio ilgis 0,15 m, plotis – 1 mm. Prie temperatūrinių plyšių nepriskirti dangoje matomi plyšiai, susidarę dėl neteisingai įrengtos skersinės siūlės.

Atstumas tarp gretimų temperatūrinių plyšių ir (arba) tiriamojo ruožo pradžios arba pabaigos nustatytas mobiliąja programėle „Rally Computer“ (ver. 1.3), kurios veikimo principas pagrįstas mobiliojo telefono GPS koordinatėmis. Mobilioji programėlė rodo atstumą nuo atskaitos pradžios 1 m tikslumu. Gamintojas deklaruoja, kad mobiliąja programėle nustatomo atstumo paklaida yra  $\pm 5$  m.

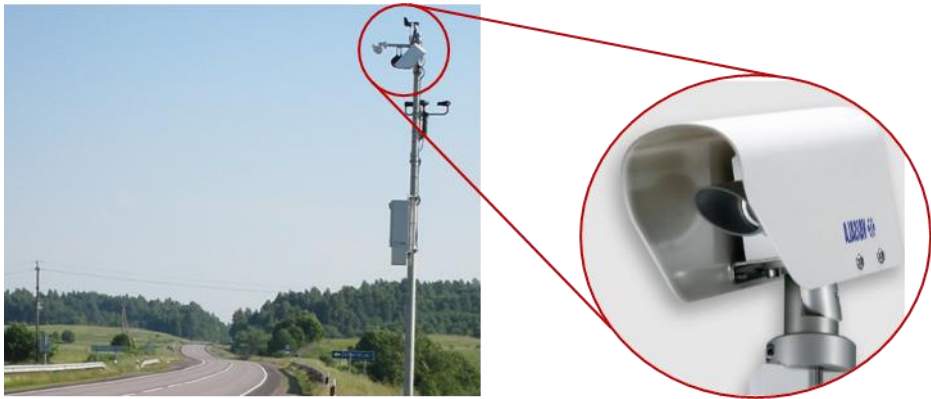
Temperatūrinių plyšių intensyvumo ir atstumo tarp jų tiriamuosiuose kelių ruožuose nustatymo rezultatai pateikti 2.4 poskyryje.

### **2.3.2. Tiriamuosiuose kelių ruožuose užfiksuotos žemiausios asfalto dangos temperatūros nustatymas**

Temperatūrinių plyšių susidarymas tiesiogiai siejamas su žemiausia asfalto dangos temperatūra, nes dėl jos vienkartinio poveikio asfalto dangoje susiformuoja temperatūriniai plyšiai (1.1 poskyris). Ši temperatūra vadinama kritine.

Dangos paviršiaus temperatūra registruojama prie kelio įrengtose Kelių oro sąlygų (KOS) stotelėse (2.6 pav.), kurios priklauso Lietuvos automobilių kelių direkcijai prie Susisiekimo ministerijos. Dangos paviršiaus temperatūra matuojama nuotoliniu jutikliu DST111 (Vaisala), įrengtu 5,0–5,5 m aukštyje, fiksuojant temperatūrą 150 cm skersmens plote vidutiniškai 10 m atstumu nutolusiame nuo jutiklio. Nuotolinis jutiklis DST111 (Vaisala) fiksuoja temperatūrą nuo  $-40$  °C iki

+60 °C 0,1 °C tikslumu. Duomenys KOS stotelėse registruojami kas 15 min. Lietuvoje yra apie 100 veikiančių KOS stotelių.



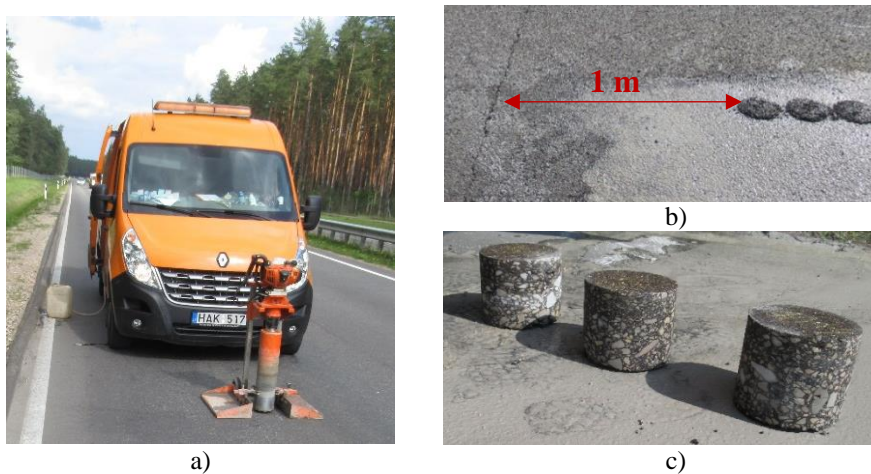
**2.6 pav.** Kelių oro sąlygų stotelė  
**Fig. 2.6.** Road weather station

Eksperimentiniam tyrimui atrinktos arčiausiai tiriamųjų kelių ruožų esančios KOS stotelės. Kai kuriems tiriamiesiems kelių ruožams priskirta po 2–3 KOS stoteles siekiant tiksliau įvertinti vietovėje užfiksuotą žemiausią asfalto dangos temperatūrą. Iš viso išanalizuoti 16-oje KOS stotelių 2006–2018 m. užfiksuoti asfalto dangos paviršiaus temperatūrų duomenys. Kiekvienam žiemos periodui kiekvienoje atrinktoje KOS stotelėje nustatyta žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra. Iš šių temperatūrų atsižvelgiant į tiriamųjų kelių ruožų eksploatacijos laikotarpį nustatyta kiekviename tiriamajame kelio ruože jo eksploatacijos metu užfiksuota žemiausia (kritinė) asfalto dangos temperatūra.

Tiriamuosiuose kelių ruožuose užfiksuotos žemiausios (kritinės) asfalto dangos temperatūros nustatymo rezultatai pateikti 2.5 poskyryje.

### **2.3.3. Gręžtinių asfalto ėminių (kernų) paėmimas**

Kiekviename tiriamajame kelio ruože ne rato riedėjimo vėžėje paimta po tris gręžtinius asfalto sluoksnių ėminius (kernus). Ėminių paėmimo vieta pasirinkta atsižvelgiant, ar tame kelio ruože yra temperatūrinių plyšių. Jeigu tiriamajame kelio ruože buvo nustatytas bent vienas temperatūrinis plyšys, tuomet gręžtiniai asfalto ėminiai (kernai) paimti 1 m atstumu nuo dangoje esančio atviro arba užtaisyto temperatūrinio plyšio (2.7 pav.). Priešingu atveju gręžtinių asfalto ėminių (kernų) paėmimo vieta pasirinkta laisvai ties tiriamojo kelio ruožo viduriu.



**2.7 pav.** Gręžtinių asfalto ėminių (kernų) paėmimas: a) grąžtas; b) paėmimo vieta; c) gręžtiniai asfalto ėminiai (kernai)

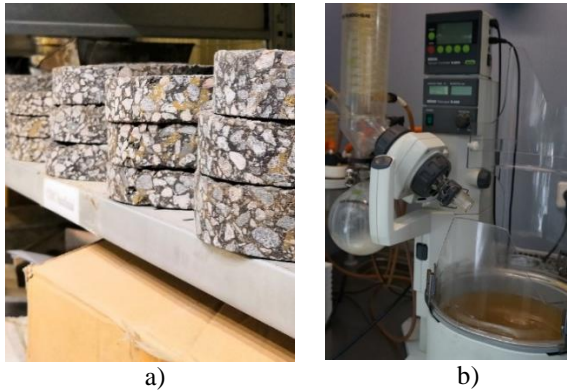
**Fig. 2.7.** Sampling of drilled asphalt (cores): a) drill; b) site of the sampling; c) samples of drilled asphalt (cores)

Ėminiams paimti naudotas kernų pjovimo mechanizmas (2.4 pav.), galintis išpjauti reikalingo skersmens kernus per visą sluoksnio, iš kurio imami ėminiai, gylį. Eksperimentiniam tyrimui atlikti išpjauti 150 mm skersmens gręžtiniai asfalto ėminiai (kernai). Gręžimo gylis pasirinktas toks, kad būtų paimti ėminiai iš visų asfalto sluoksnių. Iš viso eksperimentiniam tyrimui paimti 78-i gręžtiniai asfalto ėminiai (kernai).

### 2.3.4. Bitumo regeneravimas

Bitumo savybės kiekviename asfalto dangos sluoksnyje tolstant nuo dangos paviršiaus link pagrindo sluoksnių šiek tiek kinta. Asfalto dangos paviršiuje bitumas pasižymi blogiausiomis savybėmis, nes yra tiesiogiai veikiamas ultravioletiniais spinduliais ir oru, kas lemia bitumo oksidaciją (senėjimą), o pastarasis bitumo trapumą ir jautrumą temperatūrinių plyšių susidarymui. Temperatūriniai plyšiai atsiveria asfalto dangos paviršiuje, nes būtent čia susidaro didžiausi (kritiniai) temperatūriniai įtempia, ir skverbiasi gilyn į dangą, kur yra mažiausi temperatūriniai įtempiai (1.1 poskyris). Atsižvelgiant į visa tai bitumo regeneravimas atliktas regeneruojant tik 15 mm storio asfalto viršutinį sluoksnį, atskirtą iš paimtų gręžtinių asfalto ėminių (kernų) (2.8 pav.). Toks asfalto viršutinio sluoksnio storis pasirinktas siekiant tirti temperatūrinių plyšių susidarymui jautriausią bitumą.

Bitumo regeneravimas atliktas sukiuoju garintuvu pagal standartų LST EN 12697-3:2013 ir LST EN 12697-1:2012 reikalavimus.



**2.8 pav.** Bitumo regeneravimas: a) bitumo regeneravimui paruoštas 15 mm storio asfalto viršutinis sluoksnis; b) sukusis garintuvas

**Fig. 2.8.** Bitumen recovery: a) upper part of asphalt wearing course with a thickness of 15 mm from which bitumen was recovered; b) rotary evaporator

Atskirtas 15 mm storio asfalto viršutinis sluoksnis pirmiausiai buvo iškaitintas ir sudėtas į šaltojo ekstrahavimo prietaisą. Šiame prietaise naudojant tirpiklį dichlormetaną bitumas kartu su mikroužpildo dalelėmis atskirtas iš asfalto viršutinio sluoksnio mišinio. Po to mikroužpildo dalelės pašalintos naudojant centrifugą. Dichlormetane ištirpęs bitumas regeneruotas sukiuoju garintuvu, išgarinančiu dichlormetaną esant 150 °C temperatūrai ir 2,0 kPa slėgiui (2.8 pav.).

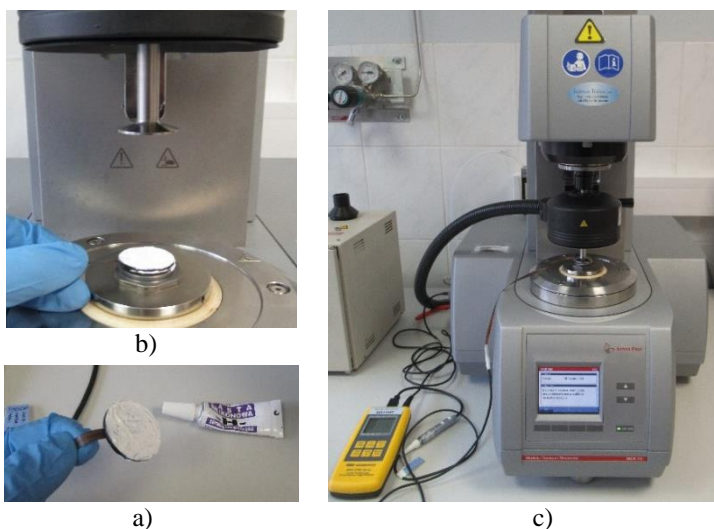
### 2.3.5. Bitumo savybių neigiamose temperatūrose nustatymas

Bitumo savybės (bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos, įtempių relaksacijos modulis ir jo kitimo rodiklis) neigiamose temperatūrose nustatytos Anton Paar pagamintu MCR 302 dinaminis šlyties reometru (DSR) naudojant 4 mm skersmens lygiagrečias plokšteles. Bandymo temperatūros pastovumą tarp viršutinės ir apatinės plokštelių užtikrina aušinimo skysčiu vėsinama Peltier sistema P-PTD200 ir specialus gaubtas H-PTD200. Toks temperatūros palaikymo elementų komplektas leidžia matavimus atlikti nuo –40 °C iki +200 °C.

Prieš atliekant bitumo savybių nustatymo bandymus, atliktas temperatūros tarp viršutinės ir apatinės plokštelių patikrinimas ir kalibracija pagal gamintojo pateiktą metodiką (Anton Paar 2018). Temperatūros patikrinimui ir kalibracijai naudotas gamintojo sukalibruotas temperatūros nustatymo komplektas, kurį sudaro 25 mm skersmens apskritimo formos temperatūrinis daviklis CSA-PP25 ir skaitmeninis matuoklis GMH 3750, išmatuotą temperatūrą tiesiogiai perduodan-



tis į dinaminį šlyties reometrą (2.9 pav.). Kadangi bitumo savybes eksperimentiniame tyrime numatyta tirti tik neigiamose temperatūrose, tai temperatūros tarp viršutinės ir apatinės plokštelių patikrinimas ir kalibracija atlikta nuo 0 °C iki –25 °C žeminant temperatūrą kas 5 °C. Atliekant temperatūros patikrinimą ir kalibraciją papildomai įtraukta 70 °C temperatūra, kadangi ši temperatūra buvo taikoma adhezijos tarp bandinio ir apatinės plokštelės užtikrinimui. Temperatūros patikrinimas ir kalibracija atlikta 0,001 °C tikslumu. Kalibracijos koeficientų įvedimui taikyta trečio laipsnio polinominė funkcija. Atliktas temperatūros patikrinimas ir kalibracija užtikrina, kad skirtumas tarp faktinės temperatūros, išmatuotos tarp viršutinės ir apatinės plokštelių išoriniu matuokliu, ir dinaminio šlyties reometru fiksuojamos temperatūros nėra didesnis nei 0,1 °C.



**2.9 pav.** Temperatūros patikrinimas ir kalibracija: a) temperatūrinis daviklis, padengtas šilumai laidžia pasta; b) temperatūrinio daviklio uždėjimas ant apatinės plokštelės; c) temperatūros nustatymo komplektas, sujungtas su dinaminio šlyties reometru

**Fig. 2.9.** Verification and calibration of temperature: a) temperature sensor covered with thermal paste; b) alignment of temperature sensor with the bottom plate; c) temperature measuring set connected with dynamic shear rheometer

Neigiamose temperatūrose bitumas yra kietas, todėl bandinio deformavimui reikalingas daug didesnis sukimo momentas nei atliekant bandymus esant vidutinėms (nuo 4 °C iki 40 °C) arba aukštoms ( $\geq 46$  °C) temperatūroms, kuomet atitinkamai naudojamos 8 mm ir 25 mm skersmens plokštelės. Siekiant sumažinti bandiniui deformuoti reikalingą sukimo momentą, bitumo savybės neigiamose temperatūrose nustatomos naudojant 4 mm skersmens plokšteles.

Atliekant bandymus dinaminio šlyties reometru ne visas užduotas kampinis poslinkis pasiekia bandinį, nes tam tikra jo dalis persiduoda prietaiso komponentams (varikliui ir matavimo sistemai (viršutinei plokštei)). Atliekant bandymus vidutinėse (nuo 4 °C iki 40 °C) arba aukštose ( $\geq 46$  °C) temperatūrose kampinis poslinkis, persiduodantis prietaiso komponentams yra mažas ir nereikšmingas lyginant su kampiniu poslinkiu, pasiekiančiu bandinį, todėl įprastai nevertinama kampinio poslinkio, persiduodančio prietaiso komponentams, įtaka bandymų rezultatams. Tačiau tiriant medžiagas, pasižyminčias aukštu kompleksiniu šlyties moduliui (pvz. tiriant bitumą neigiamose temperatūrose), kampinis poslinkis, persiduodantis prietaiso komponentams, turi reikšmingą įtaką gaunamiems rezultatams ir turi būti įvertinamas. Kampinio poslinkio, persiduodamo prietaiso komponentams, įtaka bandymų rezultatams nustatyta pagal gamintojo pateiktą metodiką (Anton Paar 2014), kurią taip pat rekomendavo Farrar ir kt. (2015). Kampinio poslinkio, persiduodamo prietaiso komponentams, įtakai bandymų rezultatams nustatyti naudoti greitai kietėjantys klizai, kuriais sulipintos 4 mm skersmens viršutinė ir apatinė plokštelės 10  $\mu$ m atstumu viena nuo kitos. Gautam 10  $\mu$ m storio klizų bandiniui atliktas pakopinis sukimo momento bandymas sukimo momentą didinant nuo 0,5 mN×m iki 150 mN×m. Atlikus kampinio poslinkio tiesinės priklausomybės nuo sukimo momento analizę nustatytas reometro radialusis koeficientas (angl. *radial compliance*), įvertinantis kampinio poslinkio persidavimą prietaiso komponentams. Remiantis juo apskaičiuotas matavimo geometrijos (viršutinės plokštelės) koeficientas, įvertinantis jai perduodamą kampinį poslinkį. Nustatytas matavimo geometrijos (viršutinės plokštelės) koeficientas, įvertinantis jai persiduodamą kampinį poslinkį, įvestas į dinaminio šlyties reometro programinę įrangą, kuri pateikdama dinaminio šlyties reometru išmatuotus rezultatus automatiškai įvertina kampinį poslinkį, persiduodantį prietaiso komponentams.

Bitumo savybėms (bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio riboms, įtempių relaksacijos moduliui ir jo kitimo rodikliui) neigiamose temperatūrose nustatyti naudoti 4 mm skersmens ir apie 3 mm aukščio silikoningose formose suformuoti bandiniai. Kiekvieną dieną prieš atliekant bandymus nustatyta dinaminio šlyties reometro variklio inercija ir matavimo geometrijos (viršutinės plokštelės) inercija bei nulinė plokštelių pozicija numatytoje bandymo temperatūroje.

Bitumo bandinio sukibimas su viršutine ir apatine plokštelėmis užtikrintas taikant sukurtą bandinio paruošimo procedūrą, kuri apima matavimo geometrijos (viršutinės plokštelės) trumpalaikį (apie 8–10 s) pakaitinimą ant iki 200 °C įkaitusios elektrinės kaitlentės, įkaitusios viršutinės plokštelės prispaudimą prie bandinio, įdėjimą į dinaminį šlyties reometrą, nuleidimą iki apatinės plokštelės, pakaitintos iki 70 °C, paliekant 1,870 mm atstumą tarp plokštelių, bandinio uždengimą gaubtuvu, po kuriuo bandinys iki 2 min palaikomas 70 °C temperatūroje, temperatūros sumažinimą iki 20 °C, bandinio apkirpimą ir viršutinės plokštelės nuleidimą iki 1,750 mm (2.10 pav.).



Įprastai bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos nustatomos atliekant pakopinį deformacijų bandymą (angl. *strain sweep test*) tam tikroje temperatūroje esant pastoviam dažniui. Bandymui atlikti taikomas vienas bandinys. Tokiu būdu nustatomas deformacijų intervalas, taikytinas osciliaciniams bandymams. Tačiau bitumo įtempių relaksacijos bandyme priešingai nei osciliaciniuose bandymuose netaikomas dažnis, t. y. bandymo rezultatai vertinami laiko nuo bandinio apkrovimo pradžios atžvilgiu. Osciliacinių bandymų metu taikomas dažnis, atitinkantis bitumo įtempių relaksacijos bandymo tam tikrą laiką nuo bandinio apkrovimo pradžios, apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

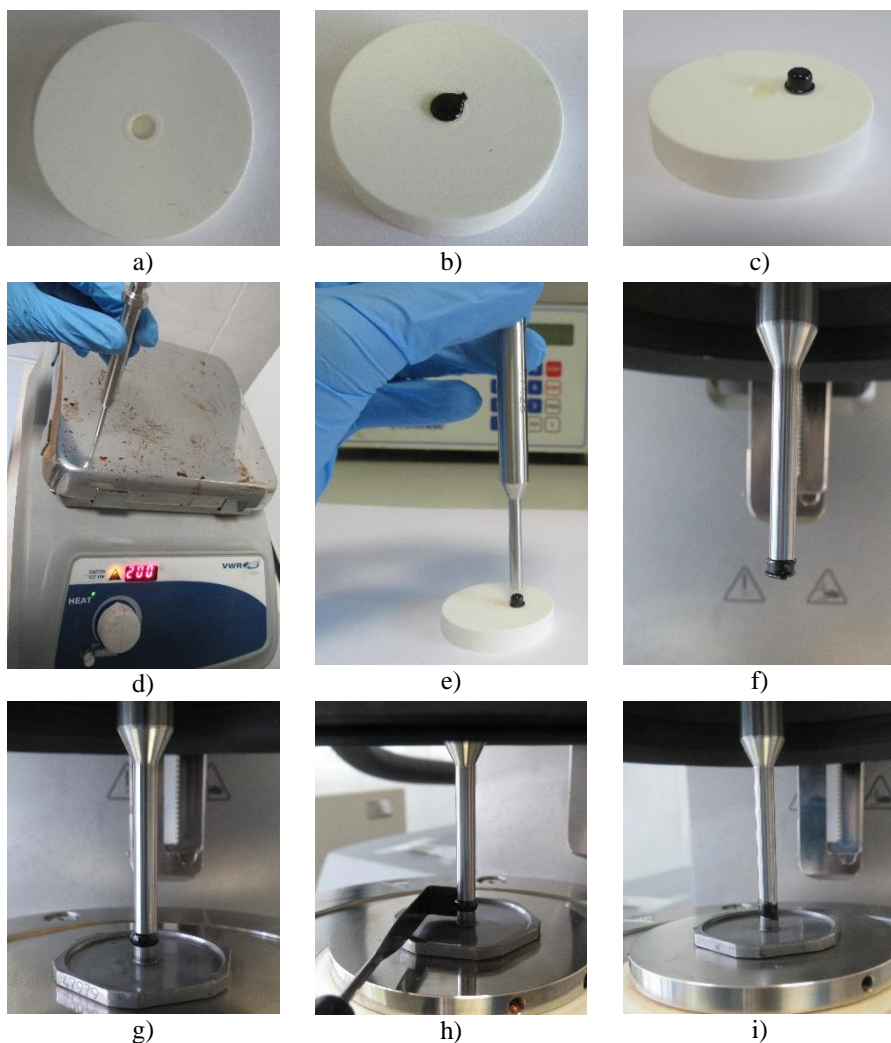
$$\omega = \frac{1}{t}, \quad (2.3)$$

čia  $\omega$  – dažnis, rad/s;  $t$  – laikas nuo bandinio apkrovimo pradžios, s.

Atliekant bitumo savybių neigiamose temperatūrose tyrimus įprastai taikomas laiko-temperatūros superpozicijos principas. Remiantis juo bandymas atliekamas 10 °C aukštesnėje temperatūroje nei žemiausia asfalto dangos temperatūra ir bitumo savybės analizuojamos ties 60 s laiko momentu. Pagal 2.1 formulę 60 s laiko momentas atitinka 0,0167 rad/s dažnį, o tai yra 0,00266 Hz. Rinkoje esančiais dinaminiais šlyties reometrais negalima atlikti bandymų esant tokiam mažam dažniui, todėl įprastai taikoma tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymo metodika negali būti naudojama apibrėžti bitumo įtempių relaksacijos bandymo atlikimui taikytinų bandinio deformacijų.

Iš teorijos žinoma, kad bitumo bandymus galima laikyti atliekamais tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose, jei gauti rezultatai bandymus atliekant prie skirtingų deformacijų nesiskiria reikšmingai. Remiantis tuo buvo parengta bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymo metodika, paremta bitumo įtempių relaksacijos bandymų pakartotiniu atlikimu esant skirtingoms deformacijoms.

Parengtoje metodikoje analizuotas bitumo įtempių relaksacijos modulio po 60 s kitimas priklausomai nuo bandymui taikytų deformacijų. Bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s nustatytas atliekant bitumo įtempių relaksacijos bandymą. Bitumo įtempių relaksacijos bandymas atliktas esant 0,0001, 0,0003, 0,0005, 0,0007, 0,0009, 0,001, 0,003, 0,005, 0,007, 0,009, 0,01, 0,015, 0,02 ir 0,025 deformacijoms. Jei bandinys suirdavo esant mažesnėms deformacijoms nei 0,025, tai deformacijos toliau nebebuvo didinamos. Atlikti pradiniai bandymai parodė, kad bitumas negrįžta į pradinę padėtį praėjus net 2 val. po nukrovimo (deformacijų pašalinimo). Vadinasi, tam pačiam bandiniui negalima atlikti pakopinio deformacijų bandymo, nes po kiekvieno deformavimo bandinyje lieka susiformavę liekamosios deformacijos. Todėl bitumo įtempių relaksacijos bandymas buvo atliekamas kiekvieną kartą kiekvienam deformacijų lygmeniui paruošiant naują bandinį.



**2.10 pav.** Bandinio paruošimas bandymams dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens plokštelėmis: a) silikoninė forma; b) forma, užpildyta bitumu; c) iš formos išimtas bandinys; d) viršutinės plokštelės pakaitinimas; e) viršutinės plokštelės prispaudimas prie bandinio; f) bandinys, pritvirtintas prie viršutinės plokštelės; g) bandinys prieš apkirpimą; h) bandinio apkirpimas; i) bandinys paruoštas bandymui (po apkirpimo)

**Fig. 2.10.** Specimen preparation for dynamic shear rheometer tests with parallel plates in diameter of 4 mm: a) silicon mould; b) mould filled with bitumen; c) the specimen out of the mould; d) preheating of the upper plate; e) pressing of the upper plate to specimen; f) specimen attached to the upper plate; g) specimen before trimming; h) trimming of the specimen; i) specimen prepared for the test (after trimming)

Tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos nustatytos  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūroje trumpalaikiu (RTFOT) ir ilgalaikiu (PAV) sendinimo metodu pagal standartų LST EN 12607-1:2015 ir LST EN 14769:2012 reikalavimus pasendintam polimerais modifikuotam bitumui PMB 45/80-55 ir kelių bitumui 70/100. Tirtieji bituminiai rišikliai pasirinkti atsižvelgiant į tiriamuosiuose kelių ruožuose taikytų bituminių rišiklių rūšis, o temperatūros – į tiriamuosiuose kelių ruožuose užfiksuotą žemiausią asfalto dangos temperatūrą, kuri buvo padidinta  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Rezultatų vertinimo metu priimta, kad bandymo metu taikytos deformacijos patenka į tiesiškai tampriai klampaus būvio ribas, jei bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s nesiskiria daugiau nei  $10\%$  nuo išmatuotų verčių esant skirtingoms deformacijoms, patenkančioms į tiesiškai tampriai klampaus būvio ribas, vidurkio.

Tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymo rezultatai pateikti 2.5.1 skirsnyje.

Bitumo įtempių relaksacijos moduliui ir jo kitimo rodikliui nustatyti neigiamose temperatūrose dinaminio šlyties reometru su  $4\text{ mm}$  skersmens plokštelėmis atliktas bitumo įtempių relaksacijos bandymas. Bandymo metu  $108\text{ s}$  bandinys buvo veikiamas pastoviomis deformacijomis, pasirinktomis atsižvelgiant į 2.5.1 skirsnio rezultatus užtikrinant, kad bandymas atliekamas tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose. Bandymo temperatūra pasirinkta atsižvelgiant į tiriamuosiuose kelių ruožuose užfiksuotą žemiausią asfalto dangos temperatūrą (2.4. poskyris), kuri buvo padidinta  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bitumo įtempių relaksacijos bandymas atliktas po tris kartus esant toms pačioms deformacijoms kiekvienam tiriamajam bitumui. Kai kuriems tiriamiesiems bitumams, pasirinktiems atsižvelgiant į 2.6 poskyrio rezultatus, buvo papildomai atlikti bitumo įtempių relaksacijos bandymai priimant, kad KOS stotelėje užfiksuota žemiausia asfalto dangos temperatūra yra  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  žemesnė. Šie papildomi bandymai atlikti siekiant įvertinti KOS stotelėse galimai netiksliai išmatuotos temperatūros įtaką ribinėms sąlygoms, apibrėžiančioms temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose. KOS stotelėse nuotoliniu jutikliu DST111 (Vaisala) matuojamos asfalto dangos temperatūros tikslumu abejojama dėl jutiklio eksploatacijos metu neatliekamos kalibracijos bei patikrinimo su faktine asfalto dangos temperatūra jutiklio duomenų nuskaitymo momentu. Kadangi nėra faktinių duomenų apie nuotoliniu jutikliu DST111 (Vaisala) užfiksuotos temperatūros nuokrypį nuo faktinės asfalto dangos paviršiaus temperatūros, tai atsižvelgiant į infraraudonųjų spindulių jutikliais gaunamą nuokrypį, pasirinkta matavimų tikslumo įtakos ribinėms sąlygoms vertinimui taikyti  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  nuokrypį.

Bitumo įtempių relaksacijos modulis bet kuriuo laiko momentu apskaičiuojamas pagal bandymo metu išmatuojamus įtempius ir bandiniui užduotą pastovią deformaciją taikant 2.1 formulę, o bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklis bet kuriuo laiko momentu apskaičiuojamas pagal 2.2 formulę. Bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio nustatymo rezultatai pateikti 2.5.2 skirsnyje.

## 2.4. Temperatūrinių plyšių intensyvumo tiriamuosiuose kelių ruožuose nustatymo rezultatai

Eksperimentiniam tyrimui atrinktuose 26-ioose Lietuvos automobilių kelių ruožuose, iš kurių trijuose didžiausias įšalo gylis yra užfiksuotas didesnis nei 1,5 m, 2017 m. rudenį ir 2018 m. pavasarį atliktų apžiūrų rezultatai pateikti 2.1 lentelėje ir B priede. 2.1 lentelėje pateikiami apibendrinti tiriamuosiuose kelių ruožuose atliktų apžiūrų rezultatai, t. y. temperatūrinių plyšių intensyvumas (plyšių ilgis, tenkantis 1 km ilgio ruožui) ir temperatūrinių plyšių intensyvumo pokytis lyginant 2017 m. rudens ir 2018 m. pavasario duomenis. Tai leido identifikuoti 2017–2018 m. žiemos įtaką temperatūrinių plyšių susidarymui. Tuo tarpu B priede pateikiami detalūs apžiūrų rezultatai, t. y. temperatūrinių plyšių skaičius, bendras plyšių ilgis, temperatūrinių plyšių intensyvumas, ir mažiausias, didžiausias bei vidutinis atstumas tarp temperatūrinių plyšių.

**2.1 lentelė.** Temperatūrinių plyšių intensyvumas 2017 m. rudenį ir 2018 m. pavasarį  
**Table 2.1.** Severity of low temperature cracking in autumn 2017 and spring 2018

Nr. <sup>1)</sup>	Įren- gimo (re- konstra- vimo) metai	Temperatūrinių ply- šių intensyvumas, m/km		Poky- tis, m/km	Asfalto viršu- tinio sluoks- nio mišinio rūšis ir tipas	Bitumo rūšis
		2017 m. ruduo	2018 m. pavasaris			
1	2	3	4	5	6	7
1	2012	0,0	0,0	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
2	2011	0,0	0,0	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
3	2010	4,5	4,5	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
4	2010	9,7	9,7	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
5	2015	2,3	3,5	1,3	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
6	2007	12,8	15,0	2,3	AC 11 VS	PMB 45/80-55E
7	2006	4,5	6,3	1,8	AC 11 VS	70/100
8	2009	18,9	18,9	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
9	2009	28,4	28,4	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
10	2016	0,0	0,0	–	SMA 11/8 S	PMB 45/80-55E
11	2016	0,0	0,0	–	SMA 11/8 S	PMB 45/80-55E
12	2009	18,5	20,3	1,8	SMA 11 S	PMB 45/80-55E

2.1 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7
13	2017	0,0	0,0	–	SMA 8 S	PMB 45/80-55E
14	2008	13,5	13,5	–	SMA 8 S	PMB 45/80-55E
15	2017	0,0	0,0	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
16	2007	21,0	22,5	1,5	SMA TM 0/8	PMB 45/80-55E
17	2012	11,6	11,6	–	AC 11 VN	70/100
18	2017	0,0	0,0	–	SMA 8 N	PMB 45/80-55E
19	2011	21,2	21,2	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
20	2011	10,6	21,2	10,6	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
21	2013	0,0	0,0	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
22	2013	0,0	0,0	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
23	2016	0,0	2,0	2,0	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
24	2016	0,0	0,0	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
25	2013	1,5	1,5	–	SMA 11 S	PMB 45/80-55E
26	2013	0,0	0,8	0,8	SMA 11 S	PMB 45/80-55E

Pastabos:

- Tiriamieji kelių ruožai, kuriuose didžiausias įšalo gylis  $\geq 1,5$  m
- Tiriamieji kelių ruožai, kuriuose nustatytas plyšių pokytis po 2017–2018 m. žiemos

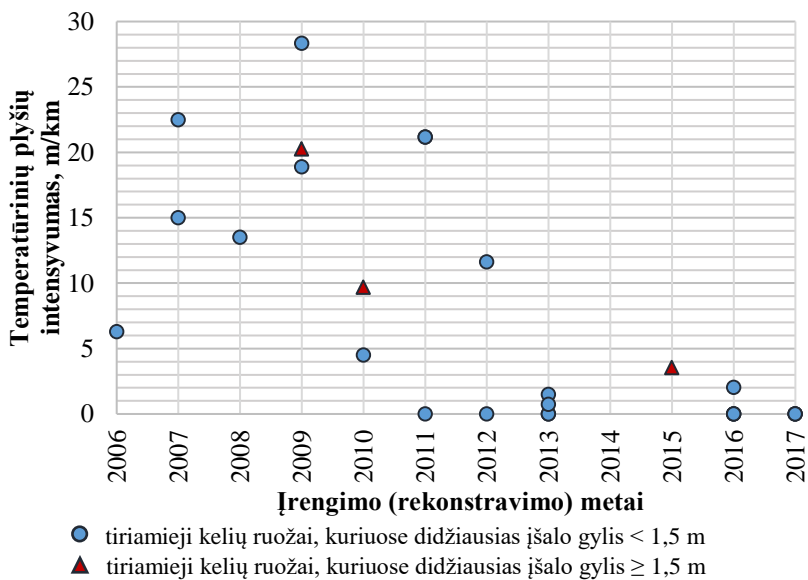
<sup>1)</sup> – išsamus tiriamųjų kelių ruožų apibūdinimas pagal nurodytą Nr., kuris kinta nuo 1 iki 26, pateiktas A priede.

Kadangi tiriamieji keliai yra skirtingos valstybinės reikšmės ir jie atitinka skirtingas kelio kategorijas, kas lemia skirtingą kelio dangos plotį, tai visų tiriamųjų kelių dangos plotis skaičiuojant kiekviename ruože nustatytą bendrą plyšių ilgį ir temperatūrinių plyšių intensyvumą buvo suvienodintas (normalizuotas) primant, kad visuose kelių ruožuose kelio dangos plotis yra 9 m. Kelių ruožuose su skiriamąja juosta kiekviena kelio pusė priimta kaip naujas tiriamasis kelio ruožas.

Analizuojant 2017 m. rudenį ir 2018 m. pavasarį tiriamuosiuose kelių ruožuose nustatytą temperatūrinių plyšių intensyvumą nustatyta, kad 2017–2018 m. žiema lėmė temperatūrinių plyšių intensyvumo padidėjimą trečdalyje tirtųjų kelių ruožų (2.1 lentelė). Mažiausias temperatūrinių plyšių intensyvumo padidėjimas (0,8 m/km) nustatytas 26-ame kelio ruože, tuo tarpu didžiausias (10,6 m/km) – 20-ame kelio ruože. Dviejuose tiriamuosiuose kelių ruožuose 2017–2018 m. žiema buvo kritinė ir lėmė pirmųjų temperatūrinių plyšių susidarymą (23-iame ir

26-ame kelio ruožuose). 23-iame kelio ruože atsivėrė vienas plyšys per visą kelio dangos plotį, o 26-ame kelio ruože – vienas plyšys per pusę kelio dangos pločio. Kadangi iš tiriamųjų kelių ruožų gręžtiniai asfalto sluoksnių ėminiai (kernai) paimti 2018 m. vasarą, tai toliau analizuojami tik 2018 m. pavasario duomenys.

2.11 paveiksle pateiktas temperatūrinių plyšių intensyvumas priklausomai nuo tiriamojo kelio ruožo įrengimo (rekonstravimo) metų. Nustatyta, kad pirmaisiais penkiais dangos eksploatavimo metais tiriamuosiuose kelių ruožuose nepasireiškė temperatūriniai plyšiai arba jų kiekis buvo minimalus (iki 3,5 m/km). Tuo tarpu šeštaisiais ir tolimesniais dangos eksploatavimo metais dangos funkcionavimo skirtingai. Pavyzdžiui, tiriamajame 20-ame kelio ruože, kuris įrengtas (rekonstruotas) 2011 m., temperatūrinių plyšių intensyvumas siekė 21,2 m/km, o 2-ame kelio ruože, kuris įrengtas (rekonstruotas) tais pačiais metais kaip ir 20-ame kelio ruože, temperatūriniai plyšiai vis dar nepasireiškė. Iš 26-ių tiriamųjų kelių ruožų 17-oje temperatūrinių plyšių intensyvumas buvo mažesnis nei 10 m/km nepriklausomai nuo kelio ruožo įrengimo (rekonstravimo) metų.



**2.11 pav.** Temperatūrinių plyšių intensyvumas priklausomai nuo kelio ruožo įrengimo (rekonstravimo) metų (matavimai atlikti 2018 m. pavasarį)

**Fig. 2.11.** Severity of low temperature cracking depending on the road section construction / reconstruction year (assessment was done in spring 2018)

Tiriamuosiuose kelių ruožuose nustatyto temperatūrinių plyšių intensyvumo priklausomybė taip pat analizuota taikyto asfalto viršutinio sluoksnio mišinio rūšies ir tipo bei bitumo rūšies atžvilgiu. Tačiau atliktos analizės metu nenustatyta sąsaja tarp temperatūrinių plyšių intensyvumo ir asfalto viršutinio sluoksnio mišinio rūšies ir tipo bei bitumo rūšies. Taip pat nenustatyta ne mažesnio kaip 1,5 m didžiausio įšalo gylio įtaka temperatūrinių plyšių intensyvumui.

Analizuojant tiriamuosiuose kelių ruožuose 2018 m. nustatytą atstumą tarp atsivėrusių temperatūrinių plyšių gauta, kad temperatūriniai plyšiai tiriamuosiuose ruožuose yra susiformavę vidutiniškai kas 162–1556 m (B priedas). Nustatytas mažiausias atstumas tarp temperatūrinių plyšių yra 5 m (5-as ir 9-as kelio ruožas), o didžiausias – 4395 m (5-as kelio ruožas). Eksperimentinio tyrimo metu nepastebėta temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose tendencijų.

## 2.5. Kritinių temperatūrų pasiskirstymo asfalto dangų paviršiuje rezultatai

Eksperimentiniam tyrimui atrinktose arčiausiai tiriamųjų kelių ruožų esančiose KOS stotelėse 2006–2018 m. užfiksuotos žemiausios asfalto dangų paviršiaus temperatūros pateiktos C priede. Išanalizavus šias temperatūras kiekvienam tiriamajam kelio ruožui priimta jo eksploatacijos metu užfiksuota žemiausia (kritinė) asfalto dangos temperatūra pateikta 2.2 lentelėje.


**2.2 lentelė.** Kritinės temperatūros tiriamųjų kelių ruožų asfalto dangų paviršiuje  
**Table 2.2.** Critical surface temperature of asphalt pavement in analysed road sections

Nr.	Įrengimo (rekonstravimo) metai	KOS stotelė		Kritinė asfalto dangos temperatūra, °	Žiema, kuomet užfiksuota kritinė asfalto dangos temperatūra
		Nr.	Pavadinimas		
1	2	3	4	5	6
1	2012	386	Tartokas	–21,4	2013–2014
2	2011	682	Rumšiškės	–23,4	2011–2012
3	2010	1241	Pageležiai	–18,3	2015–2016
4	2010	408	Svėdasai	–21,8	2011–2012
5	2015	1125	Daugailiai	–17,5	2016–2017
6	2007	105	Druskininkai	–23,2	2011–2012
7	2006	105	Druskininkai	–23,2	2011–2012

2.2 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6
8	2009	101	Bukiškės	–25,0	2011–2012
9	2009	101	Bukiškės	–25,0	2011–2012
10	2016	1101	Bukiškės	–19,3	2016–2017
11	2016	1101	Bukiškės	–19,3	2016–2017
12	2009	136	Pabradė	–25,6	2011–2012
13	2017	308	Vievis	–17,0	2017–2018
14	2008	141	Maišiagala	–24,1	2011–2012
15	2017	1132	Maišiagala	–16,7	2017–2018
16	2007	141	Maišiagala	–24,1	2011–2012
17	2012	2481	Gudeliai	–20,5	2016–2017
18	2017	1135	Ukmergė	–15,6	2017–2018
19	2011	681	Vilnius	–24,1	2011–2012
20	2011	681	Vilnius	–24,1	2011–2012
21	2013	4021	Galvė	–21,6	2016–2017
22	2013	4021	Galvė	–21,6	2016–2017
23	2016	1101	Bukiškės	–19,3	2016–2017
24	2016	1101	Bukiškės	–19,3	2016–2017
25	2013	4021	Galvė	–21,6	2016–2017
26	2013	4021	Galvė	–21,6	2016–2017

Pastabos:

 Tiriamieji kelių ruožai, kuriuose didžiausias įšalo gylis  $\geq 1,5$  m

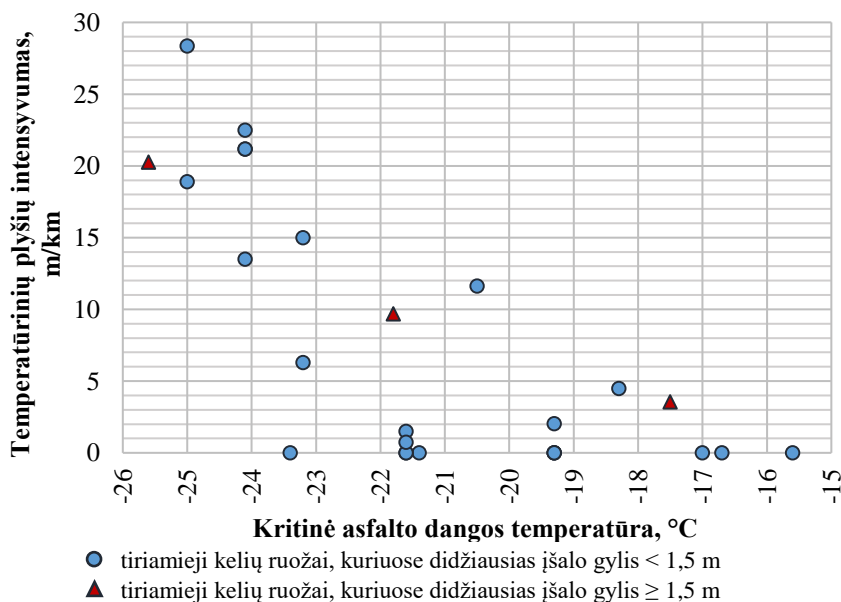
<sup>1)</sup> – išsamus tiriamųjų kelių ruožų apibūdinimas pagal nurodytą Nr., kuris kinta nuo 1 iki 26, pateiktas A priede.

Analizuojant arčiausiai tiriamųjų kelių ruožų esančiose KOS stotelėse užfiksuotas kritinės asfalto dangos temperatūras nustatyta, kad žemiausia kritinė asfalto dangos temperatūra (–25,6 °C) užregistruota 2011–2012 m. žiemą KOS stotelėje „Pabradė“ (12-as kelio ruožas). 65,3 % tiriamųjų kelių ruožuose kritinė asfalto dangos temperatūra buvo žemesnė nei –20,0 °C (KOS stotelės – Tartokas, Rumšiškės, Svėdasai, Druskininkai, Bukiškės, Pabradė, Maišiagala, Gudeliai, Vilnius ir Galvė) ir 26,9 % – žemesnė nei –24,0 °C (KOS stotelės – Bukiškės, Pabradė, Maišiagala, Gudeliai ir Vilnius). Aukščiausia kritinė asfalto dangos temperatūra



( $-15,6^{\circ}\text{C}$ ) užfiksuota 2017–2018 m. žiemą KOS stotelėje „Ukmergė“ (18-as kelio ruožas). Tik trijuose kelių ruožuose (Nr. 13, 15 ir 18) kritinė asfalto dangos temperatūra buvo ne žemesnė kaip  $-17,0^{\circ}\text{C}$  (KOS stotelės – Vievis, Gudeliai, Ukmergė). Tiriamųjų kelių ruožų kritinė asfalto dangos temperatūra taip pat analizuota didžiausio įšalo gylio atžvilgiu. Atliktos analizės metu nenustatyta ne mažesnio kaip 1,5 m didžiausio įšalo gylio įtaka kritinei asfalto dangos temperatūrai.

Analizuojant kritines temperatūras asfalto dangų paviršiuje, užfiksuotas arčiausiai tiriamųjų kelių ruožų esančiose KOS stotelėse, ir žiemą, kuomet užfiksuota ta temperatūra, nustatyta, kad 2011–2012 m., 2013–2014 m., 2015–2016 m., 2016–2017 m. ir 2017–2018 m. žiemos tiriamuosiuose kelių ruožuose lėmė kritinę (žemiausią) asfalto dangos temperatūrą. Pabrėžtina, kad 2011–2012 m. žiema buvo pati atšiauriausia temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu, nes 11-oje tiriamųjų kelių ruožų iš 12-os, kurie eksploatuoti 2011–2012 m. žiemą, kritinė asfalto dangos temperatūra nustatyta būtent šią žiemą. Tiramajame 3-iame kelio ruože, kuris įrengtas (rekonstruotas) 2010 m. ir eksploatuotas 2011–2012 m. žiemą, kritinė asfalto dangos temperatūra nustatyta 2015–2016 m. žiemą. Tai galimai lėmė dėl techninių kliūčių 2010–2012 m. KOS stotelėje „Pageležiai“ neišmatuota asfalto dangos temperatūra (duomenų trūkumas).



**2.12 pav.** Temperatūrinių plyšių intensyvumas priklausomai nuo kritinės asfalto dangos temperatūros, užfiksuotos artimiausioje kelių oro sąlygų stotelėje

**Fig. 2.12.** Severity of low temperature cracking depending on the critical (the lowest) surface temperature of asphalt pavement that was recorded in the nearest road weather station

Tiriamuosiuose kelių ruožuose nustatyto temperatūrinių plyšių intensyvumo pasiskirstymas priklausomai nuo artimiausioje KOS stotelėje užfiksuotos kritinės asfalto dangos temperatūros pateiktas 2.12 paveiksle. Analizuojant tiriamųjų kelių ruožuose nustatytą temperatūrinių plyšių intensyvumą priklausomai nuo kritinės asfalto dangos temperatūros, užfiksuotos artimiausioje KOS stotelėje, pastebėta tendencija, kad kuo žemesnė kritinė asfalto dangos temperatūra, tuo didesnis temperatūrinių plyšių intensyvumas nepriklausomai nuo didžiausio įšalo gylio. Toks asfalto dangų funkcionavimas grindžia nepageidaujamą neigiamų temperatūrų poveikį bitumo funkcionavimui temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu. Esant žemesnei nei  $-23,4^{\circ}\text{C}$  kritinei asfalto dangos temperatūrai, tiriamųjų kelių ruožuose atsiveriančių ir besivystančių temperatūrinių plyšių intensyvumas visais atvejais yra didesnis nei  $13\text{ m/km}$ . Toks funkcionavimas nustatytas  $26,9\%$  tiriamuosiuose kelių ruožuose. Tuo tarpu žemiausiai asfalto dangos temperatūrai neviršijant  $-20,5^{\circ}\text{C}$ , tiriamųjų kelių ruožai funkcionuoja be temperatūrinių plyšių arba jų intensyvumas yra minimalus, t. y. iki  $4,5\text{ m/km}$ . Toks funkcionavimas nustatytas  $34,6\%$  tiriamuosiuose kelių ruožuose.

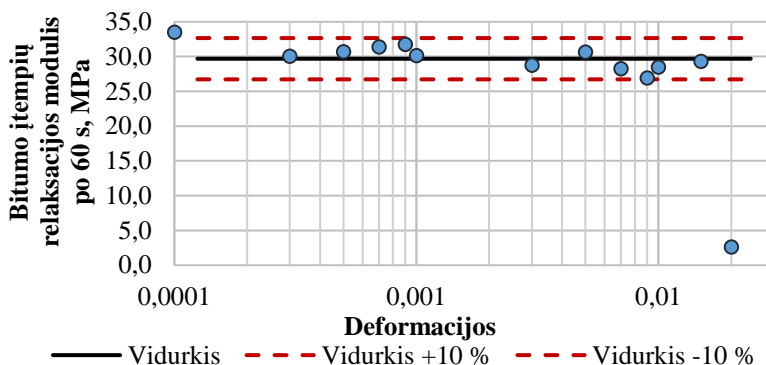
## 2.6. Bitumo savybių tyrimo rezultatai

### 2.6.1. Tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos

Trumpalaikiu (RTFOT) ir ilgalaikiu (PAV) sendinimo metodu pasendinto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 ir kelių bitumo 70/100 tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymo  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$  ir  $-15^{\circ}\text{C}$  temperatūroje rezultatai pateikti D priede.

Nustatyta, kad neigiamoje temperatūroje abu tirtieji bitumai funkcionuoja tiesiškai tampriai klampiam būvyje iki kritinio momento, kuris stebimas staigiu bandinio suirimu (bandinys sutrupa), lemiančiu ženkliai mažesnę bitumo įtempių relaksacijos modulio vertę, nepriklausomai nuo bandymo temperatūros. Pavyzdžiui, 2.13 paveiksle pateiktame polimerais modifikuoto bitumo įtempių relaksacijos modulio po 60 s kitimo grafike priklausomai nuo bandymui taikomų deformacijų esant  $-10^{\circ}\text{C}$  temperatūrai matyti, kad bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s nenukrypsta nuo išmatuotų verčių vidurkio daugiau kaip  $10\%$ , kai bandiniui suteikiamos deformacijos kinta nuo  $0,003$  iki  $0,015$ . Tačiau esant  $0,025$  deformacijoms bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s sumažėja daugiau nei 11 kartų (iki  $2,65\text{ MPa}$ ) lyginant su išmatuotų verčių vidurkiu esant mažesnėms nei  $0,025$  deformacijoms. Būtent šiuo kritiniu momentu stebimas staigus bandinio suirimas, t. y. bandinio sutrupėjimas.

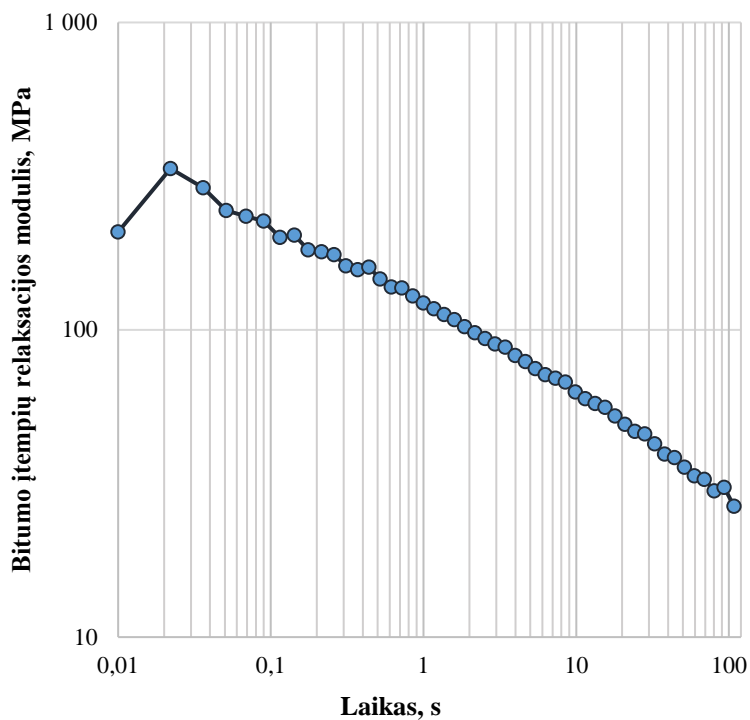
Toks bitumo funkcionavimas nepasireiškia esant aukštoms ( $\geq 46\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) arba vidutinėms (nuo  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) bandymo temperatūroms: įprastai stebimas tolygus matuojamos charakteristikos (dažniausiai kompleksinio šlyties modulio) mažėjimas.



**2.13 pav.** Polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 RTFOT+PAV įtempių relaksacijos modulio po 60 s esant  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai kitimas priklausomai nuo deformacijų

**Fig. 2.13.** Stress relaxation modulus at 60 s of polymer modified bitumen PMB 45/80-55 RTFOT+PAV depending on the strain at temperature of  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Analizuojant kiekvieną bitumo įtempių relaksacijos bandymą atskirai nustatyta, kad esant 0,0001 (visais atvejais) ir 0,0003 (kai kuriais atvejais) deformacijoms bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo laike kreivė yra netolygi, t. y. stebimas rezultatų išsibarstymas (2.14 pav.). To priežastis – dinaminio šlyties reometro techninės galimybės, nes bandinio deformacijos yra labai mažos (0,0001) ir joms pasiekti reikalingas itin mažas sukimo momentas, kurio negali suteikti prietaisas. Siekiant išvengti bitumo įtempių relaksacijos modulio matavimo rezultatų paklaidų dėl dinaminio šlyties reometro techninių galimybių, 0,0001 ir 0,0003 deformacijos buvo atmetos ir neanalizuotos nustatant bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribas. Visos kitos deformacijos, kurioms esant bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s nenukrypo daugiau kaip 10 % nuo išmatuotų verčių vidurkio, buvo laikomos, patenkančiomis į tiesiškai tampriai klampaus būvio ribas. Trumpalaikiu (RTFOT) ir ilgalaikiu (PAV) sendinimo metodu pasendinto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 ir kelių bitumo 70/100 tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos esant  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai pateiktos 2.3 lentelėje. 2.3 lentelėje taip pat pateiktas bitumo įtempių relaksacijos modulio po 60 s ( $G(60)$ ) variacijos koeficientas, apskaičiuotas analizuojant bandymų rezultatus, gautus tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose.



**2.14 pav.** Bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimas laike esant  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai ir 0,0001 deformacijoms

**Fig. 2.14.** Stress relaxation modulus depending on time at temperature of  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  and strain of 0.0001

**2.3 lentelė.** Bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos ir įtempių relaksacijos modulio  $G(60)$  variacijos koeficientas

**Table 2.3.** Linear viscoelastic range and variation coefficient of stress relaxation modulus at 60 s

Bitumo charakteristika		Bituminio rišiklio rūšis					
		PMB 45/80-55			70/100		
		$-5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-15\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos	nuo	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
	iki	0,015	0,015	0,010	0,010	0,020	0,015
$G(60)$ variacijos koeficientas, %		5,35	4,92	3,57	4,36	4,80	4,44

Nustatyta, kad neigiamose temperatūrose polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 ir kelių bitumo 70/100 tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos skiriasi neženkiai ir nepriklauso nuo temperatūros. Visais atvejais tirtųjų bitumų tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos pažeistos viršijus 0,010–0,020 deformacijas. Plačiausios tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos nustatytos kelių bitumui 70/100 esant  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai. Šiuo atveju siekiant bandymus atlikti tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose gali būti taikomos deformacijos nuo 0,0004 iki 0,02. Greičiausiai bandinys suiro tiriant polimerais modifikuotą bitumą PMB 45/80-55 esant  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai ir kelių bitumą 70/100 esant  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai. Abiem atvejais tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos apibrėžtos deformacijų kitimu nuo 0,0004 iki 0,010. Pabrėžtina, kad bitumo tyrimams, atliekamiems tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose, rekomenduojama taikyti deformacijas, esančias tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų viduryje. Tokiu atveju eliminuojama galima bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų pažeidimo tikimybė.

Bitumo įtempių relaksacijos modulio po 60 s variacijos koeficientas tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose kito nuo 3,57 % (PMB 45/80-55 esant  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai) iki 5,35 % (PMB 45/80-55 esant  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai). Kelių bitumui 70/100 nustatytas įtempių relaksacijos modulio po 60 s variacijos koeficientas tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose kito nuo 4,36 % esant  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai iki 4,80 % esant  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai. Tai grindžia aukštą bitumo įtempių relaksacijos bandymais gaunamų rezultatų pakartojamumą ir šio metodo tinkamumą tirti bitumo funkcionavimą žemose temperatūrose. Rezultatų analizė parodė, kad bitumo įtempių relaksacijos modulio po 60 s variacijos koeficiento kitimas tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose nepriklauso nuo bituminio rišiklio rūšies ir bandymo temperatūros.

### 2.6.2. Įtempių relaksacijos modulis ir jo kitimo rodiklis

Nustatytos bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio vertės laikytos patikimomis, jei kiekviena iš trijų išmatuotų bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio po 60 s vertė atitinkamai nesiskyrė daugiau kaip 9 % ir 2 % nuo išmatuotų trijų verčių vidurkio. Nuokrypio nuo vidurkio vertės riba pasirinkta atlikus bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio nuokrypių įtakos žemiausiai kritinei temperatūrai analizę (E priedas). Gauta, kad nustatant žemiausią kritinę temperatūrą 9 % ir 2 % nuokrypio riba atitinkamai nuo bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio lemia mažesnę nei  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  paklaidą. Bitumo įtempių relaksacijos modulio nuokrypio ribos (9 %) pasirinkimą taip pat grindžia standarto LST EN 14771-2012 reikalavimuose nurodyta lenkimo standžio, įprastai taikomo bitumo atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti, pakartojamumo vertė. Bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo

rodiklio nuokrypio riba (2 %) sugriežtinta lyginant su standarto LST EN 14771-2012 reikalavimuose nurodyta lenkimo standžio kitimo rodiklio pakartojamumo verte (4 %), nes pastaroji lemtų didesnę nei 1,8 °C paklaidą nustatant žemiausią kritinę temperatūrą (E priedas).

Bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio nustatymo rezultatai po 60 s esant 10 °C aukštesnei bandymo temperatūrai nei kritinė temperatūra, užfiksuota tiriamojo ruožo asfalto dangos paviršiuje jo eksploatacijos metu, atitinkamai pateikti 2.4 ir 2.5 lentelėse. Kiekviena iš trijų nustatytų bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio verčių nuo vidurkio atitinkamai nenukrypo daugiau kaip 8 % ir 2 %.

**2.4 lentelė.** Bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s

**Table 2.4.** Stress relaxation modulus at 60 s

Nr. <sup>1)</sup>	Kritinė asfalto dangos temperatūra, °C	Bandymo temperatūra, °C	Bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s, MPa			
			1	2	3	vidurkis
1	2	3	4	5	6	7
1	-21,4	-11,4	23,5	23,4	23,0	23,3
2	-23,4	-13,4	34,4	38,0	34,7	35,7
3	-18,3	-8,3	19,3	19,7	19,5	19,5
4	-21,8	-11,8	22,9	25,2	24,1	24,1
5	-17,5	-7,5	16,2	15,3	15,1	15,5
6	-23,2	-13,2	40,2	41,0	40,2	40,5
7	-23,2	-13,2	33,7	34,6	37,3	35,2
8	-25	-15	48,3	45,0	49,5	47,6
9	-25	-15	64,1	60,0	67,8	64,0
10	-19,3	-9,3	18,9	18,5	17,5	18,3
11	-19,3	-9,3	12,3	12,8	12,3	12,5
12	-25,6	-15,6	50,6	48,5	51,4	50,2
13	-17	-7	11,7	12,3	10,9	11,6
14	-24,1	-14,1	47,9	45,6	47,4	47,0
15	-16,7	-6,7	8,9	9,0	8,2	8,7
16	-24,1	-14,1	49,9	47,8	48,7	48,8

2.4 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7
17	-20,5	-10,5	23,0	21,4	22,1	22,2
18	-15,6	-5,6	7,2	6,6	6,9	6,9
19	-24,1	-14,1	41,2	41,1	43,0	41,8
20	-24,1	-14,1	45,5	43,3	44,4	44,4
21	-21,6	-11,6	35,5	34,8	37,2	35,8
22	-21,6	-11,6	33,6	35,5	32,6	33,9
23	-19,3	-9,3	18,2	18,0	17,6	17,9
24	-19,3	-9,3	16,6	16,2	15,9	16,2
25	-21,6	-11,6	37,9	38,1	36,1	37,4
26	-21,6	-11,6	33,0	37,7	35,0	35,2

*Pastabos:* <sup>1)</sup> – išsamus tiriamųjų kelių ruožų apibūdinimas pagal nurodytą Nr., kuris kinta nuo 1 iki 26, pateiktas A priede.

**2.5 lentelė.** Bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklis po 60 s**Table 2.5.** The slope of stress relaxation modulus at 60 s

Nr. <sup>1)</sup>	Kritinė asfalto dangos temperatūra, °C	Bandymo temperatūra, °C	Bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklis po 60 s			
			1	2	3	vidurkis
1	2	3	4	5	6	7
1	-21,4	-11,4	0,456	0,449	0,447	0,451
2	-23,4	-13,4	0,431	0,425	0,435	0,430
3	-18,3	-8,3	0,511	0,508	0,512	0,510
4	-21,8	-11,8	0,421	0,421	0,416	0,419
5	-17,5	-7,5	0,434	0,437	0,438	0,436
6	-23,2	-13,2	0,428	0,431	0,425	0,428
7	-23,2	-13,2	0,503	0,503	0,504	0,503
8	-25	-15	0,398	0,410	0,403	0,404
9	-25	-15	0,347	0,354	0,346	0,349

2.5 lentelės pabaiga

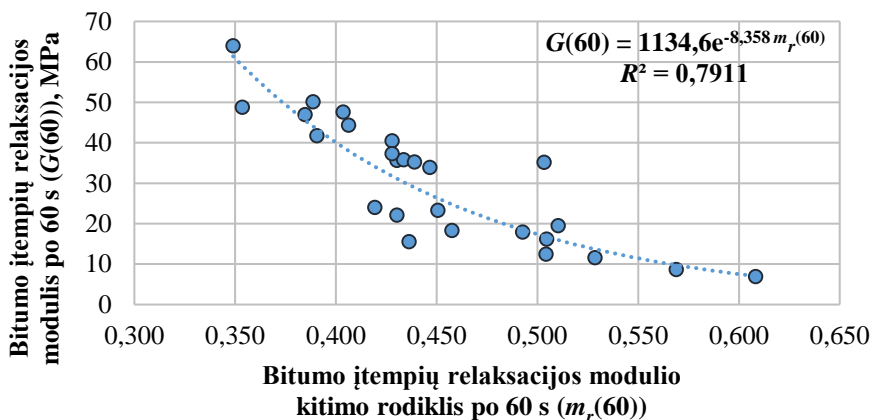
1	2	3	4	5	6	7
10	-19,3	-9,3	0,457	0,458	0,458	0,458
11	-19,3	-9,3	0,499	0,504	0,510	0,504
12	-25,6	-15,6	0,389	0,388	0,389	0,389
13	-17	-7	0,525	0,532	0,529	0,529
14	-24,1	-14,1	0,385	0,383	0,386	0,385
15	-16,7	-6,7	0,563	0,572	0,572	0,569
16	-24,1	-14,1	0,352	0,355	0,354	0,354
17	-20,5	-10,5	0,431	0,430	0,430	0,430
18	-15,6	-5,6	0,606	0,610	0,609	0,608
19	-24,1	-14,1	0,387	0,393	0,392	0,391
20	-24,1	-14,1	0,405	0,406	0,408	0,406
21	-21,6	-11,6	0,436	0,433	0,432	0,434
22	-21,6	-11,6	0,444	0,447	0,449	0,447
23	-19,3	-9,3	0,499	0,490	0,489	0,493
24	-19,3	-9,3	0,505	0,503	0,506	0,505
25	-21,6	-11,6	0,427	0,429	0,428	0,428
26	-21,6	-11,6	0,441	0,437	0,439	0,439

*Pastabos:* <sup>1)</sup> – išsamus tiriamųjų kelių ruožų apibūdinimas pagal nurodytą Nr., kuris kinta nuo 1 iki 26, pateiktas A priede.

Nustatyta, kad bitumo įtempių relaksacijos modulis ir jo kitimo rodiklis po 60 s priklauso nuo bandymo temperatūros, t. y. ir nuo kritinės asfalto dangos temperatūros. Kuo bandymo temperatūra arba kritinė asfalto dangos temperatūra žemesnė, tuo didesnė bitumo įtempių relaksacijos modulio vertė ir tuo mažesnis bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklis. Didžiausias bitumo įtempių relaksacijos modulis ir mažiausias jo kitimo rodiklis po 60 s (atitinkamai 64,0 MPa ir 0,349) nustatyti 9-ajame tiriamajame kelio ruože, kuriame užfiksuota -25,0 °C kritinė asfalto dangos temperatūra. Nors šiame ruože taikyto bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio po 60 s vertės tarp visų nustatytų verčių yra ribinės, tačiau kritinė asfalto dangos temperatūra nėra žemiausia. Kritiškiausia asfalto dangos temperatūra (-25,6 °C)



nustatyta tiriamajame 12-ame kelio ruože. Šiame ruože taikytas bitumas pasižymėjo įtempių relaksacijos moduliu po 60 s lygiu 50,2 MPa ir jo kitimo rodikliu – 0,389. Mažiausias bitumo įtempių relaksacijos modulis ir didžiausias jo kitimo rodiklis po 60 s (atitinkamai 6,9 MPa ir 0,608) nustatyti 18-ajame tiriamajame kelio ruože, kuriame užfiksuota –15,6 °C kritinė asfalto dangos temperatūra. Ši temperatūra yra aukščiausia kritinė asfalto dangos temperatūra iš visų tiriamuosiuose ruožuose nustatytų kritinių asfalto dangos temperatūrų.



**2.15 pav.** Bitumo įtempių relaksacijos modulio priklausomybė nuo jo kitimo rodiklio  
**Fig. 2.15.** Stress relaxation modulus at 60 s versus its slope at 60 s

Bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio po 60 s tarpusavio sąryšis pateiktas 2.15 paveiksle. Nustatyta, kad bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s priklauso nuo jo kitimo rodiklio ir ši priklausomybė apibūdinama eksponentine funkcija, kurios determinacijos koeficientas – 0,7911. Vadinasi, kuomet didesnė bitumo įtempių relaksacijos modulio vertė, tuo mažesnis jo kitimo rodiklis. Bitumas, pasižymintis didele įtempių relaksacijos modulio verte ir maža jo kitimo rodiklio verte, lemia temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose, todėl tai nėra pageidaujamos bitumo savybės atsparumo temperatūriams plyšiams aspektu (2.1 poskyris).

## 2.7. Antrojo skyriaus išvados

1. 2013–2017 m. įrengtuose (rekonstruotuose) kelių ruožuose jų eksploataavimo metais asfalto dangose nepasireiškė temperatūriniai plyšiai arba jų

kiekis buvo minimalus (iki 3,5 m/km). Tai galimai lėmė tuo laikotarpiu vyrausios pakankamai švelnios žiemos (žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra kito nuo  $-16,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  2017 m. iki  $-21,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  2013 m.). Tuo tarpu asfalto dangos, eksploatuotos ne mažiau kaip šešis metus, funkcionavo skirtingai, tačiau nenustatyta temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose tendencijų. Taip pat nenustatyta sąsaja tarp temperatūrinių plyšių intensyvumo ir asfalto dangos viršutinio sluoksnio mišinio rūšies ir tipo bei bitumo rūšies ir ne mažesnio kaip 1,5 m didžiausio įšalo gylio.

2. 91,7 % tiriamuosiuose kelių ruožuose, kurie eksploatuojami nuo 2006 m., 2011–2012 m. žiemą užfiksuota kritinė (žemiausia) asfalto dangos temperatūra nepriklausomai nuo dangos amžiaus. Ši žiema išskirtina kaip pati atšiauriausia temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu.
3. Atlikta temperatūrinių plyšių intensyvumo priklausomybės nuo žemiausios asfalto dangos temperatūros analizė parodė, kad  $-20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir  $-23,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūros yra kritinės temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu. Žemiausiai asfalto dangos temperatūrai neviršijant  $-20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūros asfalto dangos funkcionuoja be temperatūrinių plyšių arba jų intensyvumas yra minimalus (iki 4,5 m/km), o esant žemesnei nei  $-23,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai, asfalto dangose atsiveriančių ir besivystančių temperatūrinių plyšių intensyvumas viršija 13 m/km. Žemiausiai asfalto dangos temperatūrai kintant nuo  $-20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $-23,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  tiriamųjų kelių ruožų asfalto dangos funkcionuoja skirtingai (temperatūrinių plyšių intensyvumas kito nuo 0 m/km iki 15 m/km).
4. Pradiniai bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymo bandymai atlikti bitumo įtempių relaksacijos bandymui taikant pakopinį deformavimą paneigė tokio deformavimo tinkamumą tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymui, nes jau po pirmojo apkrovimo bandinyje susiformavo liekamosios deformacijos. Todėl bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribas, taikytinas įtempių relaksacijos bandymui atlikti, reikia nustatyti atliekant pakartotinius bitumo įtempių relaksacijos bandymus kiekvieną kartą kiekvienam deformacijų lygmeniui paruošiant naują bandinį.
5. Neigiamoje temperatūroje bitumas funkcionuoja tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose (bitumo įtempių relaksacijos modulio po 60 s variacijos koeficientas kito nuo 3,57 % iki 5,35 %) iki kritinio momento, kuris stebimas staigiu bandinio suirimu, lemiančiu ženkliai (daugiau nei 3 kartais lyginant su vidurkiu) mažesnę bitumo įtempių relaksacijos modulio vertę, nepriklausomai nuo bandymo temperatūros ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ir

bituminio rišiklio rūšies. Toks bitumo funkcionavimas (bandinio suirimas) nepasireiškia esant aukštoms ( $\geq 46$  °C) ir vidutinėms (nuo 4 °C iki 40 °C) bandymo temperatūroms.

6. Atlikti skaičiavimai parodė, kad bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio po 60 s rezultatų patikimumas užtikrinamas taikant reikalavimą, kad kiekviena atskiroji vertė negali nukrypti daugiau kaip 9 % ir 2 % atitinkamai nuo gautų bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio verčių vidurkio. Tokiu atveju nustatytos žemiausios kritinės temperatūros paklaida neviršija 0,8 °C.
7. Bitumo įtempių relaksacijos modulis ir jo kitimo rodiklis priklauso nuo bandymo temperatūros. Kuo žemesnė neigiama bandymo temperatūra, tuo didesnė bitumo įtempių relaksacijos modulio vertė ir tuo mažesnė jo kitimo rodiklio vertė. Bitumo įtempių relaksacijos modulio priklausomybę nuo jo kitimo rodiklio apibūdina eksponentinė funkcija (determinacijos koeficientas 0,791).



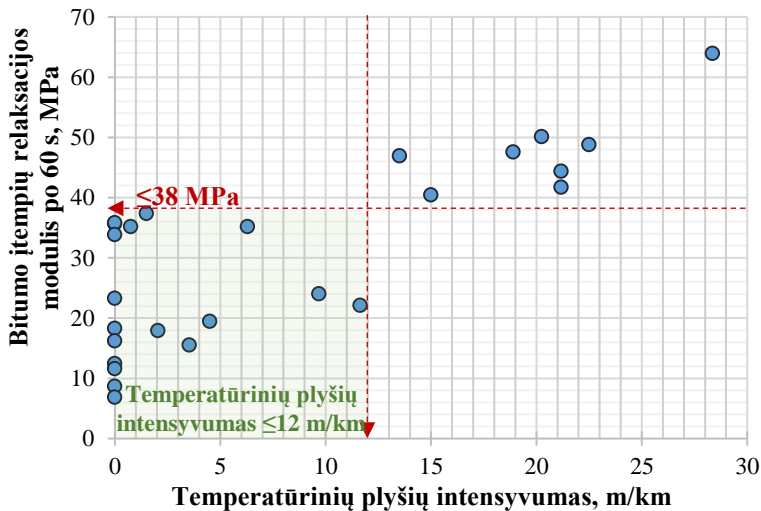
---

## **Bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo taikymas asfalto dangų atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti**

Šiame skyriuje nustatytos bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinės sąlygos asfalto dangų atsparumo temperatūriniais plyšiams aspektu, atsižvelgiant į eksperimentinio tyrimo rezultatus patikslintas bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamas teorinis algoritmas, pateiktas algoritmo taikymas bitumo parinkimui atsižvelgiant į žemiausią asfalto dangos temperatūrą bei nustatytas šio algoritmo taikymo ekonominis efektas lyginant su įprastai taikoma bitumo parinkimo metodika.

### 3.1. Bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinės sąlygos temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu

Remiantis 2018 m. pavasarį tiriamuosiuose kelių su asfalto danga ruožuose nustatytais temperatūrinių plyšių intensyvumo rezultatais (2.4 poskyris) ir iš šių ruožų paimtų gręžtinių ėminių (kernų) regeneruotam bitumui nustatytais įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio rezultatais esant 10 °C aukštesnei temperatūrai nei kritinė asfalto dangos temperatūra, t. y. nei žemiausia asfalto dangos paviršiuje užfiksuota temperatūra tiriamojo ruožo eksploatacijos metu (2.6.2 skirsnis), sudaryti bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio pasiskirstymo grafikai priklausomai nuo temperatūrinių plyšių intensyvumo (3.1 ir 3.2 pav.).



**3.1 pav.** Bitumo įtempių relaksacijos modulio ribinė sąlyga temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu

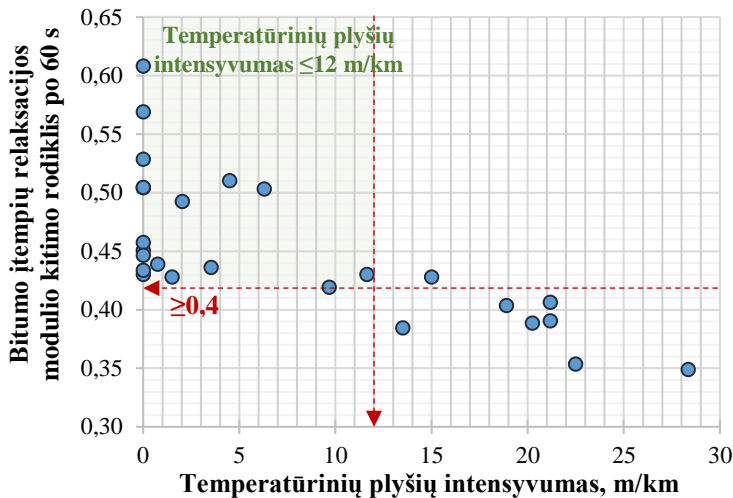
**Fig. 3.1.** Limit (criterion) of stress relaxation modulus to prevent and minimize development of low temperature cracks

Kaip matyti iš 3.1 paveikslo, didėjant bitumo įtempių relaksacijos modulio po 60 s vertei temperatūrinių plyšių intensyvumas taip pat didėja. Tai patvirtina, kad egzistuoja tam tikra ribinė bitumo įtempių relaksacijos modulio vertė, kurios neviršijus asfalto dangose apribojamas temperatūrinių plyšių susidarymas ir vystymasis. Todėl 3.1 paveiksle pateikti rezultatai analizuoti dviem pjūviais:

- 1) ribinės bitumo įtempių relaksacijos modulio vertės nustatymas;

- 2) temperatūrinių plyšių intensyvumo esant ribinei bitumo įtempimų relaksacijos modulio vertei nustatymas.

Išanalizavus 3.1 paveiksle pateiktus rezultatus gauta, kad bitumo įtempimų relaksacijos modulio po 60 s ribinė vertė yra 38 MPa ir šios vertės neviršijimas lemia ne didesnę kaip 12 m/km temperatūrinių plyšių intensyvumą įvertinant, kad kelio dangos plotis – 9 m.



**3.2 pav.** Bitumo įtempimų relaksacijos modulio kitimo rodiklio ribinė sąlyga temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu

**Fig. 3.2.** Limit (criterion) of slope of stress relaxation modulus to prevent and minimize development of low temperature cracks

Kaip matyti iš 3.2 paveikslo, didėjant bitumo įtempimų relaksacijos modulio kitimo rodiklio po 60 s vertei temperatūrinių plyšių intensyvumas mažėja. Tai patvirtina, kad egzistuoja tam tikra ribinė bitumo įtempimų relaksacijos modulio kitimo rodiklio vertė, kurią viršijus asfalto dangose apribojamas temperatūrinių plyšių susidarymas ir vystymasis. Todėl 3.2 paveiksle pateikti duomenys analizuoti dviem pjūviais:

- 1) ribinės bitumo įtempimų relaksacijos modulio kitimo rodiklio vertės nustatymas;
- 2) temperatūrinių plyšių intensyvumo esant ribinei bitumo įtempimų relaksacijos modulio kitimo rodiklio vertei nustatymas.

Išanalizavus 3.2 paveiksle pateiktus duomenis gauta, kad bitumo įtempimų relaksacijos modulio kitimo rodiklio po 60 s ribinė vertė yra 0,420 ir šios vertės viršijimas lemia ne didesnę kaip 12 m/km temperatūrinių plyšių intensyvumą įvertinant, kad kelio dangos plotis – 9 m.

Kadangi KOS stotelėse įrengtų nuotolinių jutiklių DST111 (Vaisala), matuojančių asfalto dangos paviršiaus temperatūrą, eksploatacijos metu neatliekama jų kalibracija ir (arba) gaunamų duomenų palyginimas su faktine asfalto dangos temperatūra jutiklio duomenų nuskaitymo momentu, tai kyla abejonių dėl šiais jutikliais užfiksuotų temperatūrų tikslumo. Siekiant įvertinti KOS stotelėse galimai netiksliai išmatuotos temperatūros įtaką bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinėms sąlygoms, apibrėžiančioms temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose, buvo atlikti papildomi bitumo įtempių relaksacijos bandymai priimanant, kad KOS stotelėje užfiksuota žemiausia asfalto dangos temperatūra yra 3 °C žemesnė nei nustatyta 2.5 poskyryje. Toks nuokrypis pasirinktas atsižvelgiant į infraraudonųjų spindulių jutikliais gaunamą nuokrypį, kadangi nėra faktinių duomenų apie nuotolinių jutikliu DST111 (Vaisala) užfiksuotos temperatūros nuokrypį nuo faktinės asfalto dangos paviršiaus temperatūros.

Papildomi bitumo įtempių relaksacijos bandymai atlikti devyniems tiriamiesiems kelių ruožams, kurių bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio vertės buvo išsidėstę šalia 3.1 ir 3.2 paveiksluose pateiktų ribinių verčių. Papildomų bandymų atlikimo metu nustatyti bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio rezultatai po 60 s esant bandymo temperatūrai 3 °C žemesnei nei 2.6.2 skirsnyje taikyta bandymo temperatūra atitinkamai pateikti 3.1 ir 3.2 lentelėse.

**3.1 lentelė.** Papildomais bandymais nustatytas bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s  
**Table 3.1.** Stress relaxation modulus at 60 s from additional tests

Nr. <sup>1)</sup>	3°C pažeminta kritinė asfalto dangos temperatūra, °C	Bandymo temperatūra, °C	Bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s, MPa			
			1	2	3	vidurkis
2	-26,4	-16,4	42,7	44,5	44,4	43,9
4	-24,8	-14,8	37,5	36,1	36,1	36,6
5	-20,5	-10,5	21,2	20,8	19,6	20,5
7	-26,2	-16,2	49,6	52,7	51,2	51,2
17	-23,5	-13,5	27,8	30,3	29,4	29,2
21	-24,6	-14,6	52,0	49,3	49,7	50,3
22	-24,6	-14,6	49,6	51,4	51,7	50,9
25	-24,6	-14,6	47,2	49,7	50,2	49,0
26	-24,6	-14,6	50,6	48,9	51,2	50,2

*Pastabos:* <sup>1)</sup> – išsamus tiriamųjų kelių ruožų apibūdinimas pagal nurodytą Nr., kuris kinta nuo 1 iki 26, pateiktas A priede.



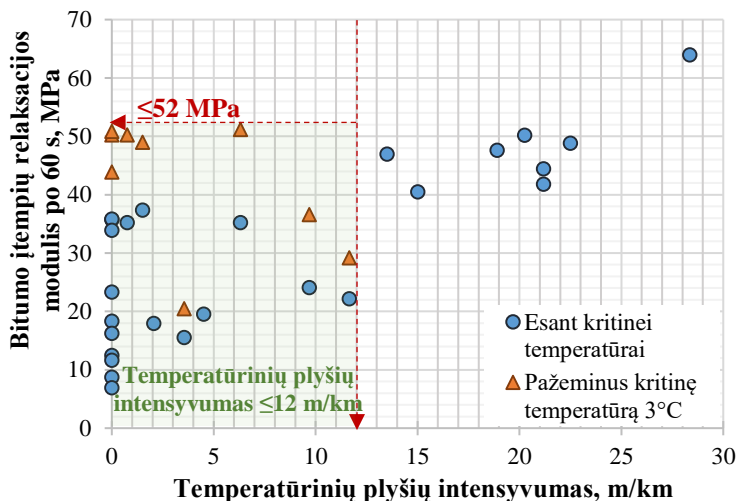
**3.2 lentelė.** Papildomais bandymais nustatytas bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklis po 60 s

**Table 3.2.** The slope of stress relaxation modulus at 60 s from additional tests

Nr. <sup>1)</sup>	3°C pažeminta kritinė asfalto dangos temperatūra, °C	Bandymo temperatūra, °C	Bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklis po 60 s			
			1	2	3	vidurkis
2	–26,4	–16,4	0,394	0,397	0,396	0,396
4	–24,8	–14,8	0,385	0,381	0,385	0,384
5	–20,5	–10,5	0,386	0,389	0,394	0,390
7	–26,2	–16,2	0,452	0,457	0,458	0,456
17	–23,5	–13,5	0,467	0,461	0,469	0,466
21	–24,6	–14,6	0,374	0,379	0,374	0,376
22	–24,6	–14,6	0,402	0,400	0,396	0,399
25	–24,6	–14,6	0,380	0,381	0,384	0,382
26	–24,6	–14,6	0,388	0,389	0,385	0,387

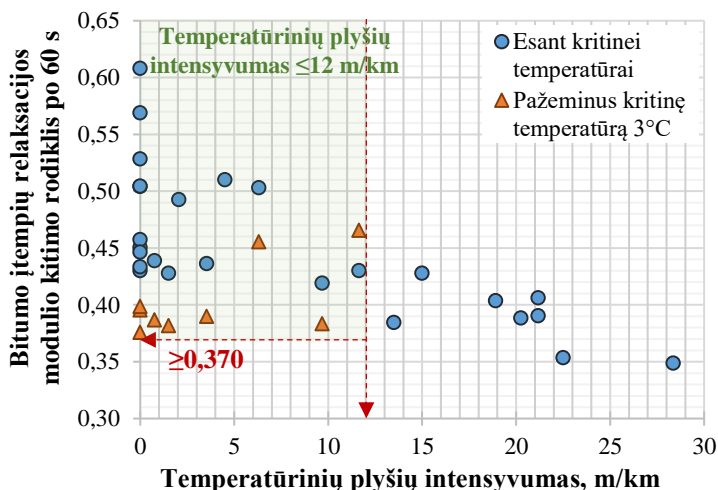
*Pastabos:* <sup>1)</sup> – išsamus tiriamųjų kelių ruožų apibūdinimas pagal nurodytą Nr., kuris kinta nuo 1 iki 26, pateiktas A priede.

3.1 ir 3.2 paveiksluose atitinkamai pateiktos bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinės sąlygos temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu patikslintos įvertinant galimai netiksliai KOS stotelėse išmatuotos kritinės asfalto dangos temperatūros įtaką ribinėms sąlygoms (3.3 ir 3.4 pav.). Kadangi nėra duomenų apie KOS stotelėse išmatuojamų asfalto dangos paviršiaus temperatūros atitikimą faktinei temperatūrai, tai vertinant asfalto dangų atsparumą temperatūriniam plyšiams tikslinga taikyti patikslintas bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio po 60 s ribines sąlygas (atitinkamai  $\leq 52$  MPa ir  $\geq 0,370$ ) bei numatyti nuotoliniu jutikliu DST111 (Vaisala) išmatuojamų asfalto dangos paviršiaus temperatūrų palyginimą su faktine asfalto dangos temperatūra. Nustačius faktinę nuotoliniu jutikliu DST111 (Vaisala) fiksuojamos temperatūros paklaidą būtina patikslinti bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribines sąlygas. Pabrėžtina, kad 3.3 ir 3.4 paveiksluose pateiktos patikslintos bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinės sąlygos įvertina nuotoliniu jutikliu DST111 (Vaisala) fiksuojamos temperatūros  $-3$  °C nuokrypį.



**3.3 pav.** Patikslinta bitumo įtempių relaksacijos modulio ribinė sąlyga temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu

**Fig. 3.3.** Refined limit (criterion) of stress relaxation modulus to prevent and minimize development of low temperature cracks



**3.4 pav.** Patikslinta bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklio ribinė sąlyga temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu

**Fig. 3.4.** Refined limit (criterion) of slope of stress relaxation modulus to prevent and minimize development of low temperature cracks

Siekiant apriboti temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose iki 12 m/km (kelio dangos plotis – 9 m) nustatytos ribinės bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio vertės po 60 s (atitinkamai 52 MPa ir 0,370) neturi būti viršijamos atliekant bitumo įtempių relaksacijos bandymą esant 10 °C aukštesnei temperatūrai nei žemiausia asfalto dangos temperatūra, užfiksuota numatytoje bitumo taikymo vietovėje per paskutinių 10–30 metų laikotarpį.

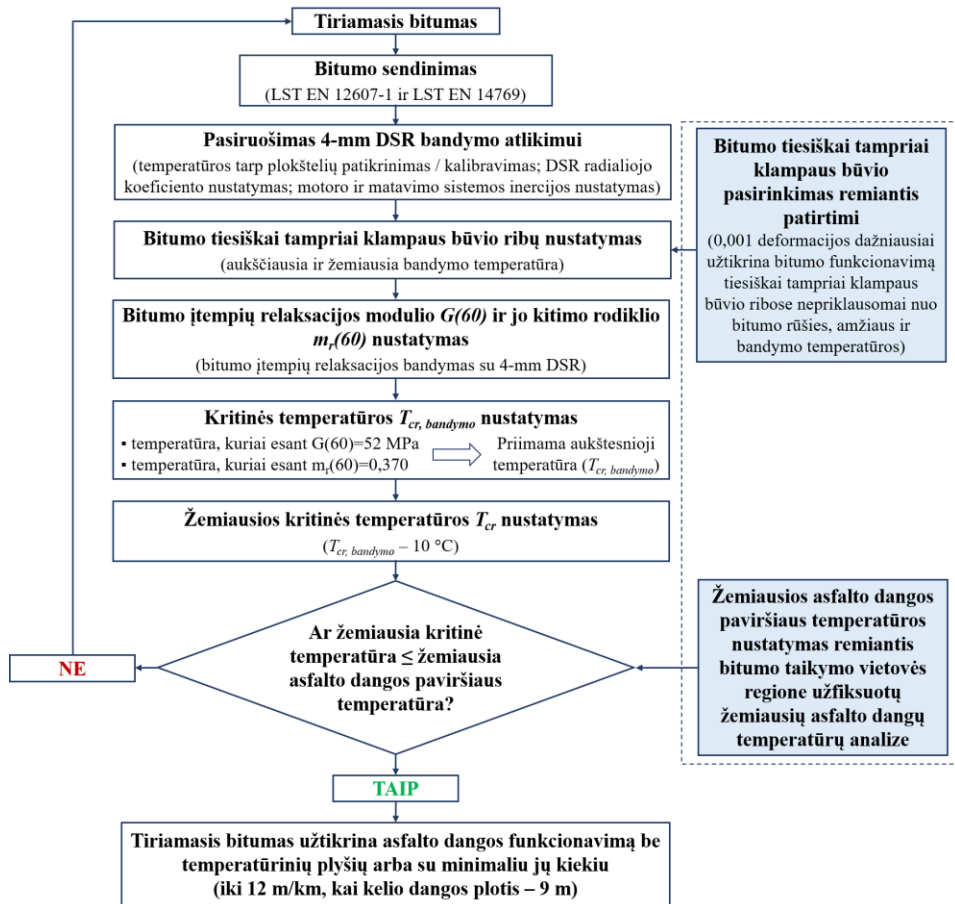
## 3.2. Teorinio algoritmo tikslinimas įvertinant eksperimentinio tyrimo rezultatus

2.1 poskyryje sukurtas teorinis bitumo įtempių relaksacijos moduliu ir jo kitimo rodikliu pagrįstas algoritmas asfalto dangų atsparumui temperatūriniams plyšiams vertinti patikslintas atsižvelgiant į eksperimentinio tyrimo rezultatus bei 3.1 poskyryje nustatytas patikslintas bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio po 60 s ribines vertes. Bitumo įtempių relaksacijos moduliu ir jo kitimo rodikliu grindžiamas algoritmas asfalto dangų atsparumui temperatūriniams plyšiams vertinti pateiktas 3.1 paveiksle. Šio algoritmo taikymas užtikrina asfalto dangos funkcionavimą be temperatūrinių plyšių arba su minimalių jų kiekiu (3.3 lentelė).

Patikslintą algoritmą sudaro dvi dalys: pagrindinė ir papildomoji. Pagrindinė algoritmo dalis yra orientuota į žemiausios kritinės temperatūros nustatymą pagal tiriamojo bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio po 60 s ribines vertes ( $G(60) \leq 52 \text{ MPa}$  ir  $m_r(60) \geq 0,370$ ) bei gautų rezultatų vertinimą temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose atžvilgiu, o papildomoji – į papildomų duomenų, būtinų bitumo įtempių relaksacijos bandymo atlikimui ir testuojamo bitumo vertinimui temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose aspektu, surinkimą ir analizę.

Pagrindinė algoritmo dalis apima tiriamojo bitumo pasirinkimą, jo sendinimą trumpalaikiu (RTFOT) ir ilgalaikiu (PAV) sendinimo metodu pagal standartų LST EN 12607-1:2015 ir LST EN 14769:2012 reikalavimus, pasiruošimą bandymų dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens plokštelėmis (4-mm DSR bandymai) atlikimui, bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymą, bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio nustatymą po 60 s atliekant bitumo įtempių relaksacijos bandymą, kritinės temperatūros nustatymą pagal bitumo įtempių relaksacijos bandymų rezultatus ir bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribines sąlygas, žemiausios kritinės temperatūros nustatymą ir palyginimą su žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra, kuri buvo užfiksuota bitumo taikymo vietovės regione. Tuo tarpu papildomoji algoritmo dalis apima patirtimi paremto tiriamojo bitumo tiesiškai tampriai klampaus

būvio ribų pasirinkimą ir žemiausios asfalto dangos paviršiaus temperatūros nustatymą pagal atliktą bitumo taikymo vietovėje užfiksuotų žemiausių asfalto dangos paviršiaus temperatūrų analizę.



**3.5 pav.** Bitumo įtempių relaksacijos moduliui ir jo kitimo rodikliu grindžiamas algoritmas asfalto dangų atsparumui temperatūriniams plyšiams vertinti

**Fig. 3.5.** Algorithm based on bitumen stress relaxation modulus and its slope to assess asphalt pavement resistance to low temperature cracking

**3.3 lentelė.** Bitumo parinkimui taikant sukurtą algoritmą apribojamas temperatūrinių plyšių intensyvumas priklausomai nuo kelio dangos pločio

**Table 3.3.** Severity of low temperature cracking depending on road width as a result of algorithm usage

Kelio dangos plotis (važiuojamoji dalis, saugos ir sustojimo juostos), m	Temperatūrinių plyšių intensyvumas, kai bitumo parinkimui taikomas sukurtas algoritmas, m/km
14,75	$\leq 20$
11,50	$\leq 15$
11,25	$\leq 15$
10,00	$\leq 13$
9,00	$\leq 12$
8,00	$\leq 11$
7,75	$\leq 10$
7,00	$\leq 9$
6,00	$\leq 8$
4,50	$\leq 6$
3,50	$\leq 5$

Kaip matyti iš 3.3 lentelės bitumo įtempčių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo taikymas apriboja temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose iki tam tikro temperatūrinių plyšių intensyvumo, kuris išreiškiamas m/km ir priklauso nuo kelio dangos pločio. Kuo didesnis kelio dangos plotis (važiuojamoji dalis bei saugos ir sustojimo juostos), tuo didesnis temperatūrinių plyšių intensyvumas, tačiau visais atvejais priimama, kad vieno kilometro ilgio kelio ruože susidarys iki 1,3 m plyšių.

### 3.3. Algoritmo taikymas bitumo parinkimui atsižvelgiant į žemiausią asfalto dangos temperatūrą

3.5 paveiksle pateiktas bitumo įtempčių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu pagrįstas algoritmas asfalto dangų atsparumui temperatūriniams plyšiams vertinti yra taikomas asfalto viršutinio sluoksnio mišinio gamybai naudotino bitumo parinkimui atsparumo temperatūriniams plyšiams aspektu. Šis algoritmas taikytinas tiesiant naują kelią, atliekant paprastąjį arba kapitalinį remontą bei rekonstravimą.

Siekiant taikyti algoritmą pirmiausiai pasirenkamas tiriamasis bitumas, kuris pasodinamas trumpalaikiu (RTFOT) ir ilgalaikiu (PAV) sendinimo metodu pagal standartų LST EN 12607-1:2015 ir LST EN 14769:2012 reikalavimus. Šių sendinimų metu bitumas veikiamas karštu oru ir slėgiu ir tokiu būdu imituojamas bitumo savybių kitimas asfalto mišinio gamybos ir klojimo metu (trumpalaikis sendinimas) bei 7–10 metų eksploatacijos periode (ilgalaikis sendinimas).

Prieš pradedant pasendinto bitumo bandymus dinaminio šlyties reometru taikant 4 mm skersmens plokšteles atliekamas temperatūros tarp viršutinės ir apatinės plokštelių patikrinimas ir kalibravimas pagal prietaiso gamintojo pateikiamą metodiką (Anton Paar 2018) naudojant sukalibruotą temperatūros nustatymo komplektą, kurį sudaro 25 mm skersmens apskritimo formos temperatūrinis daviklis ir skaitmeninis matuoklis. Temperatūros patikrinimą ir kalibravimą būtina atlikti ne rečiau kaip kas pusę metų. Taip pat prieš atliekant matavimus dinaminio šlyties reometru nustatomas radialusis koeficientas, įvertinantis kampinio poslinkio persidavimą prietaiso komponentams. Radialusis koeficientas nustatomas naudojant 4 mm skersmens plokšteles pagal gamintojo pateiktą metodiką (Anton Paar 2014) ir (arba) Farrar ir kt. (2015) rekomenduotą metodiką. Šis koeficientas nustatomas ir patikslinamas ne rečiau kaip kas pusę metų. Be to, kiekvieną dieną prieš atliekant bandymus dinaminio šlyties reometru nustatoma prietaiso variklio inercija ir 4 mm skersmens matavimo geometrijos (viršutinės plokštelės) inercija.

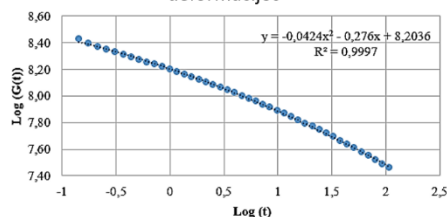
Bitumo funkcionavimas dinaminio šlyties reometru tiriamas tiesiškai tampriai klampiam būvyje, todėl būtina nustatyti šias ribas atliekant bitumo įtempių relaksacijos bandymų seką kiekvieną kartą tiriant naujai paruoštą bandinį (kaip tinkamai paruošti bandinį pateikta 2.6.1 skirsnyje) esant skirtingam (vis didesniam) deformacijų lygmeniui. Įtempių relaksacijos bandymų seka atliekama esant aukščiausiai ir žemiausiai bandymo temperatūrai iš bandymams atlikti numatyto temperatūrų intervalo. Jeigu skirtumas tarp aukščiausios ir žemiausios bandymams atlikti numatytos temperatūros yra ne didesnis kaip 6 °C, tai įtempių relaksacijos bandymų seką pakanka atlikti esant žemiausiai bandymams atlikti numatytai temperatūrai. Bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymas atliekant bitumo įtempių relaksacijos bandymų seką su vis didesnėmis deformacijomis yra imlus laikui, todėl algoritme numatyta alternatyva – bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų pasirinkimas remiantis sukaupta patirtimi. Atlikti bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymo bandymai ir gautų rezultatų analizė rodo, kad 0,001 deformacijos užtikrina bitumo funkcionavimą tiesiškai tampriai klampiam būvyje nepriklausomai nuo bitumo rūšies, amžiaus ir bandymo temperatūros (kai bandymo temperatūra kinta nuo 0 °C iki –20,0 °C).

Bitumo įtempių relaksacijos modulis ir jo kitimo rodiklis nustatomas atliekant 108 s trunkantį įtempių relaksacijos bandymą esant pastovioms deformacijoms, kurios pasirenkamos atsižvelgiant į ankstesniame algoritmo žingsnyje nustatytas tiesiškai tampriai klampaus būvio ribas arba remiantis sukaupta patirtimi.

Bandymas turi būti atliekamas ne mažiau kaip dvejose skirtingose temperatūrose, kurios viena nuo kitos skiriasi ne daugiau kaip 6 °C. Bandymo temperatūra keičiama, t. y. didinama arba mažinama, ne didesniu kaip 6 °C žingsniu tol, kol gaunama bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio po 60 s vertė esant  $T$  °C temperatūrai yra atitinkamai mažesnė nei 52 MPa ir didesnė nei 0,370, o esant  $(T-6)$  °C temperatūrai – atitinkamai didesnė nei 52 MPa ir mažesnė nei 0,370. Apskaičiuojant bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklį, kuris yra bitumo įtempių relaksacijos modulio funkcijos pirmoji išvestinė, neanalizuojami duomenys (neįtraukiami į bitumo įtempių relaksacijos modulio funkciją), kuomet nebuvo pasiektos numatytos deformacijos (3.6 pav.).

Laikas t	Temperatūra	Deformacijos	Įtempių relaksacijos modulis G(t)	Log(t)	Log(G(t))
[s]	[°C]	[1]	[Pa]	[s]	[Pa]
0,01	-12,0	0,00011	7,79E+08	-2	8,89
0,022	-12,0	0,00046	4,15E+08	-1,6576	8,62
0,036	-12,0	0,0008	3,73E+08	-1,4437	8,57
0,051	-12,0	0,00094	3,41E+08	-1,2924	8,53
0,069	-12,0	0,00097	3,26E+08	-1,1612	8,51
0,09	-12,0	0,001	2,89E+08	-1,0458	8,46
0,1151	-12,0	0,001	2,75E+08	-0,9389	8,44
0,143	-12,0	0,001	2,66E+08	-0,8447	8,42
0,176	-12,0	0,001	2,47E+08	-0,7545	8,39
0,215	-12,0	0,001	2,34E+08	-0,6676	8,37
0,259	-12,0	0,001	2,23E+08	-0,5867	8,35
0,311	-12,0	0,001	2,15E+08	-0,5072	8,33
0,371	-12,0	0,001	2,05E+08	-0,4306	8,31
0,44	-12,0	0,001	1,96E+08	-0,3565	8,29
0,5209	-12,0	0,001	1,88E+08	-0,2832	8,27
0,6151	-12,0	0,001	1,80E+08	-0,2111	8,26
0,7239	-12,0	0,001	1,72E+08	-0,1403	8,24
0,85	-12,0	0,001	1,65E+08	-0,0706	8,22
		<...>			
80,21	-12,0	0,001	3,31E+07	1,90423	7,52
93,13	-12,0	0,001	3,08E+07	1,96909	7,49
108,1	-12,0	0,001	2,87E+07	2,03383	7,46

Bitumo įtempių relaksacijos modulio funkcijai sudaryti imami tik tie duomenys, kuomet buvo pasiektos numatytos deformacijos



3.6 pav. Bitumo įtempių relaksacijos modulio funkcija

Fig. 3.6. Function of stress relaxation modulus

Tiriamą bitumų kritinę temperatūrą apibrėžia aukštesnioji bandymo temperatūra, kuriai esant bitumo įtempių relaksacijos modulio po 60 s vertė yra lygi 52 MPa arba bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklio po 60 s vertė yra lygi 0,370. Abi temperatūros apskaičiuojamos interpoliacijos būdu pagal stan-

darto ASTM C670-15 reikalavimus interpoliuojant tarp dviejų artimiausių bandymo temperatūrų, kurioms esant nustatyta didesnė ir mažesnė bitumo įtempio relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio vertė nei jų ribinės vertės.

Kritinę temperatūrą sumažinus 10 °C gaunama bitumo žemiausia kritinė temperatūra, t. y. žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra, kuriai esant asfalto dangoje nesusidaro temperatūriniai plyšiai arba jų kiekis yra minimalus (iki 12 m/km priimant, kad dangos plotis – 9 m). Pavyzdžiui, nustačius, kad kritinė temperatūra yra –13 °C, žemiausia kritinė temperatūra yra  $(-13 - 10 = -23)$  °C, t. y. asfalto dangos paviršiaus temperatūrai nenukritis žemiau –23 °C asfalto dangoje nesusidaro temperatūriniai plyšiai arba jų kiekis yra minimalus (iki 12 m/km priimant, kad dangos plotis – 9 m).

Siekiant įvertinti ar tiriamasis bitumas apriboja temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangoje, žemiausia kritinė temperatūra lyginama su žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra, užfiksuota numatytoje tiriamojo bitumo taikymo vietovėje per paskutinių 10–30 metų laikotarpį. Žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra nustatoma analizuojant bitumo taikymo vietovės regione esančiose KOS stotelėse užfiksuotas žemiausias asfalto dangos paviršiaus temperatūras. Rekomenduojama analizuoti ne mažesnio kaip paskutiniųjų 10 metų laikotarpio duomenis. F priede pateikiamas 2003–2018 m. KOS stotelėse užfiksuotų žemiausių asfalto dangos paviršiaus temperatūrų žemėlapis. Pabrėžtina, kad po kiekvienos žiemos tikslinga įvertinti asfalto dangų paviršiuje užfiksuotas temperatūras ir esant poreikiui, t. y. kai pastarosios yra žemesnės nei žemėlapyje nurodyta temperatūra, atnaujinti sudarytą žemėlapi. Taip pat būtina nustatyti nuotoliniu jutikliu DST111 (Vaisala) užfiksuotos temperatūros nuokrypį nuo faktinės asfalto dangos paviršiaus temperatūros įvertinant matuojamame plote esančią kelio dangos būklę (sausą, drėgną, šlapia, sniegą, kt.) ir atsižvelgiant į gautus rezultatus patikslinti sudarytą žemėlapi.

Žemiausios kritinės temperatūros lyginimo su žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra metu laikomasi nuostatos, kad tiriamasis bitumas užtikrins asfalto dangos funkcionavimą be temperatūrinių plyšių arba jų intensyvumas bus minimalus (3.3 lentelė), jei žemiausia kritinė temperatūra yra žemesnė nei žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra. Priešingu atveju, t. y. jei žemiausia kritinė temperatūra yra aukštesnė nei žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra, turi būti pasirenkamas kitas tiriamasis bitumas ir visi algoritme pateikiami žingsniai kartojami iš naujo.



### 3.4. Algoritmo taikymo ekonominis efektas

3.1 poskyryje pateiktas bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodiklių grindžiamas algoritmas asfalto dangų atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti apriboja temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi iki 12 m/km (kai kelio dangos plotis – 9 m). Atsižvelgiant į eksperimentinio tyrimo metu tirtųjų kelių ruožų amžių algoritmo taikymas užtikrina asfalto dangų funkcionavimą be temperatūrinių plyšių susidarymo ne mažiau kaip 12-kai metų. Vadinas, užtikrinamas pageidaujamas dangos lygumas, eismo patogumas, kuro sąnaudų pastovumas, savalaikis transporto priemonių nusidėvėjimas bei savalaikė kelio degradacija. Remiantis Lietuvos automobilių kelių direkcijos prie Susisiekimo ministerijos 2019 m. duomenimis Lietuvoje yra 21,2 tūkst. km valstybinės reikšmės kelių, iš kurių 69,7 % padengti asfalto danga. Temperatūrinių plyšių asfalto dangose susidarymo ir vystymosi valdymas lemtų efektyvų Kelių priežiūros ir plėtros programos lėšų panaudojimą, nes ženkliai sumažėtų temperatūrinių plyšių taisymui reikalingas biudžetas. Siekiant valstybinių mastų įvertinti bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo taikymo teikiamą naudą atlikti ekonominio efekto skaičiavimai, kuriais nustatyta, kiek būtų sutaupoma, jei temperatūriniai plyšiai nesusidarytų asfalto dangose arba jų intensyvumas būtų minimalus (3.1 lentelė).

Ekonominio efekto skaičiavimai atlikti sąnaudų ir naudos analizės (SNA) metodu, naudojant VŠĮ Centrinės projektų valdymo agentūros direktoriaus 2014 m. gruodžio 3 d. įsakymu Nr. 2014/8-337 patvirtintą „Investicijų projektų, kuriems siekiama gauti finansavimą iš Europos Sąjungos struktūrinės paramos ir/ar valstybės biudžeto lėšų, rengimo metodiką“, taip pat atsižvelgiant į Lietuvos automobilių kelių direkcijos prie Susisiekimo ministerijos direktoriaus 2015 m. lapkričio 26 d. įsakymu Nr. VE-23 patvirtintą „Automobilių kelių investicijų vadovą“. Ekonominio efekto skaičiavimai atlikti turto savininko – valstybės – požiūriu valstybinės reikšmės automobilių kelių tinklo mastu. SNA metode analizuotos dvi alternatyvos sąlyginai pavadintos „su algoritmu“ ir „be algoritmo“:

- „su algoritmu“ – siekiant išvengti temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi asfalto dangose, įdiegiama bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo taikymo kontrolė asfalto dangų atsparumui temperatūriniais plyšiams vertinti tiesiant, rekonstruojant ar remontuojant valstybinės reikšmės kelius su asfalto dangomis;
- „be algoritmo“ – netaikomi reikalavimai bitumo įtempių relaksacijos moduliui ir jo kitimo rodikliui tiesiant, rekonstruojant ar remontuojant valstybinės reikšmės kelius su asfalto dangomis.

SNA numatyta atlikti naujai statomiems, rekonstruojamiems ir kapitaliai remontuojamiems keliams. Nors siūlomas algoritmas taip pat turėtų būti taikomas atliekant paprastąjį remontą, tačiau jo įtraukimas į ekonominio efekto skaičiavimą

yra komplikuoatas. Atsižvelgiant į tai paprastas remontas nėra įtraukiamas į SNA. Pabrėžtina, kad 15 % naujai tiesiamų, rekonstruojamų ir kapitaliai remontuojamų kelių neįtraukiami į ekonominio efekto skaičiavimus, nes daroma prielaida, kad švelnaus klimato zonoje, kuri sudaro apie 15 % Lietuvos teritorijos, bus galima taikyti visus rinkoje esančius bitumus, t. y. jų žemiausia kritinė temperatūra bus aukštesnė nei žemiausia asfalto dangos temperatūra, užfiksuota numatytoje bitumo taikymo vietovėje per paskutinių 10–30 metų laikotarpį.

Pagal KPT SDK 19 naujos dangos konstrukcijos automagistralėms ir greitkeliams projektuojamos 30 metų projektiniam naudojimui laikotarpiui, o visiems kitiems keliams – 20 metų. Taip pat numatyta, kad naujai projektuojamo viršutinio dangos sluoksnio siektina ekonomiškai pagrįsta naudojimo trukmė nuo paklojimo ir pridavimo eksploatacijai iki jo atnaujinimo yra 12–18 metų. Kadangi nėra žinomas automagistralių ir greitkelių kiekis, tai SNA supaprastinimui taikytas vienodas projektinis naudojimo laikotarpis – 20 metų. Vadinas, temperatūrinius plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose eliminuojančios priemonės visame valstybinės reikšmės kelių tinkle bus įdiegtos per 20 metų įprastine tvarka vykdant kelių kapitalinius remontus ir rekonstravimus. Atsižvelgiant į priemonių ilgalaikį efektą (poveikį) bei tikėtiną vėlyvą atsipirkimą užsiduotas 30 metų SNA skaičiuojamasis laikotarpis.

Remiantis taikytinas plyšių užtaisymo technologijas ir jų garantinius laikotarpius apibrėžiančiais techniniais normatyviniais dokumentais KPV DT-15 ir R PT 11 įvertintos dvi temperatūrinių plyšių užtaisymo technologijos:

- išfrezavimo ir sandarinimo metodas, kurio garantinis laikotarpis 2 metai. Pagal KPV DT-15 ir R PT 11 šis metodas taikomas užtaisyti plyšiams nuo 12 mm iki 25 mm pločio, tačiau ekonominio efekto skaičiavimuose priimta, kad šis metodas taikomas taisyti visiems plyšiams iki 25 mm pločio ir kad šiuo metodu bus užtaisomi visi plyšiai, atsiveriantys iki 10-tų viršutinio asfalto dangos sluoksnio naudojimo metų. Šiuo metodu 1 m plyšio užtaisymo kaina – 6,80 eur/m (be PVM);
- Pakeitimo metodas, kurio garantinis laikotarpis 2 metai. Pagal KPV DT-15 ir R PT 11 šis metodas taikomas užtaisyti plyšiams platesniems kaip 25 mm. Ekonominio efekto skaičiavimuose priimame, kad šiuo metodu bus užtaisomi visi plyšiai, atsiveriantys vėlesniais nei 10-tais asfalto viršutinio dangos sluoksnio naudojimo metais. Šiuo metodu 1 m plyšio užtaisymo kaina – 15,67 eur/m (be PVM).

Priimama, kad po garantinio laikotarpio nepriklausomai nuo užtaisymui taikytos technologijos kitą žiemą tą patį plyšį vėl reikia užtaisyti, t. y. asfalto dangoje identifikavus temperatūrinį plyšį jis yra užtaisomas, tuomet nieko nedaroma dvi žiemos (garantinis laikotarpis) ir trečią žiemą vėl ties ta vieta atsiveria temperatūrinis plyšys, kuris užtaisomas, kai tik tam yra palankios sąlygos iki tų metų žiemos. Temperatūrinių plyšių atsivėrimas įprastai identifikuojamas pavasarį ir visi

atsivėrę temperatūriniai plyšiai yra užtaisomi, kai tik tam yra palankios sąlygos iki tų metų žiemos.

Bitumo įtempių relaksacijos moduliui ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo teikiamą ekonominę naudą sudaro temperatūrinių plyšių užtaisymo valstybinės reikšmės keliuose santaupos, t. y. išvengtų temperatūrinių plyšių užtaisymo darbų kaina. Remiantis eksperimentinio tyrimo rezultatais ekonominio efekto skaičiavimuose priimta, kad 50 % naujai įrengtose, rekonstruotose arba kapitaliai remontuotose asfalto dangose temperatūriniai plyšiai atsiveria trečiaisiais jų eksploatavimo metais ir likusiuose 50 % – šeštaisiais. Vadinas, 50 % naujai įrengtų, rekonstruotų arba kapitaliai remontų asfalto dangų patiria asfalto dangos paviršiaus temperatūrą žemesnę nei žemiausia kritinė temperatūra trečiaisiais jų eksploatavimo metais ir likę 50 % – šeštaisiais. Skirtingas žemiausios kritinės temperatūros viršijimo laikotarpis pasirinktas siekiant tiksliau įvertinti Lietuvos klimatinės sąlygas. Remiantis tiriamuosiuose kelių su asfalto danga ruožuose nustatyto temperatūrinių plyšių intensyvumu (2.4 poskyris) gauta, kad per 12-ka eksploatavimo metų temperatūrinių plyšių intensyvumas asfalto dangose neviršija 30 m/km priimant, kad kelio dangos plotis – 9 m. Atsižvelgiant į tai priimta, kad vidutiniškai susidarantis temperatūrinių plyšių intensyvumas – 3,33 vnt./km.

Atlikus temperatūrinių plyšių užtaisymui skiriamo finansavimo analizę bei atsižvelgiant į Lietuvos valstybinės reikšmės kelių tinklo sudėtį ir kelių ilgį, dangų pasiskirstymą, kelio dangos pločius, temperatūrinių plyšių vystymosi tendencijas ir plyšių užtaisymo kainas, priimta, kad kasmet temperatūrinių plyšių užtaisymui valstybinės reikšmės keliams skiriama apie 1,5 mln. eurų.

Siūlomi bitumų atrankos kriterijai apriboti temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose pasireikš kaip tam tikri apribojimai naftos produktų ir (arba) statybinių medžiagų rinkoje. Kaip taisyklė, bet kokie rinkos apribojimai lemia prekių (šiuo atveju bitumo) kainos augimą. Bitumo kainos padidėjimas pasireikštų kaip visų asfaltavimo darbų pabrangimas, t. y. atsirastų sąnaudos dėl algoritmo taikymo. Kadangi objektyviai šį galimą pabrangimą nustatyti nėra galimybės, nes reikalingi detalūs rinkos tyrimai, tai taikyta prielaida, kad siūlomo algoritmo taikymas padidins valstybinės reikšmės kelių priežiūros, remonto ir rekonstravimo finansavimo poreikį apytiksliai 1,0 %, t. y. apie 1,3 mln. eurų lyginant su 2019 m. numatytomis Kelių priežiūros ir plėtros programos finansavimo lėšomis valstybinės reikšmės kelių tinklui plėsti ir užtikrinti, kad šis tinklas veiktų. Taip pat taikyta prielaida, kad šis pabrangimo efektas pasireikš pirmais metais po bitumo įtempių relaksacijos moduliui ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo taikymo įdiegimo ir vėliau tolygiai mažės, t. y. rinka palaipsniui prisitaikys prie pakitusių sąlygų. Numatyta, kad turėtų prisitaikyti per 10 metų.

Pabrėžtina, kad ekonominio efekto skaičiavimuose naudotos 2019 m. kainų lygį atitinkančios SNA komponentų kainos. Be to, SNA skaičiavimams taikyta 5 % socialinė diskonto norma.

SNA metodu nustatyti šie atsipirkimo įverčiai:

- grynoji dabartinė vertė (GDV), parodanti projekto absoliutų ekonominį efektą atsižvelgiant į laiko veiksnį per projekto gyvavimo laikotarpį ir yra išreiškiama suminės diskontuotos naudos ir suminių diskontuotų sąnaudų skirtumu;
- vidinė gražos norma (VGN), parodanti tokią diskonto normą, kuriai esant projekto pinigų srautų grynoji dabartinė vertė yra lygi 0;
- naudos ir sąnaudų santykis (N/S), parodantis projekto rentabilumą ir išreiškiamas suminės diskontuotos naudos ir suminių diskontuotų sąnaudų santykiu.

3.4 lentelėje pateikiami bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo taikymo SNA rezultatai.

**3.4 lentelė.** Sąnaudų ir naudos analizė „su algoritmu“

**Table 3.4.** Cost–benefit analysis as algorithm is used

Metai	Sąnaudos, tūkst. eur		Nauda, tūkst. eur		Grynoji nauda, tūkst. eur		Diskonto faktorius
	Nediskontuota	Diskontuota	Nediskontuota	Diskontuota	Nediskontuota	Diskontuota	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1300,0	1238,1	0,0	0,0	–1300,0	–1238,1	0,9524
2	1170,0	1061,2	0,0	0,0	–1170,0	–1061,2	0,9070
3	1040,0	898,4	65,5	56,6	–974,5	–841,8	0,8638
4	910,0	748,7	65,5	53,9	–844,5	–694,8	0,8227
5	780,0	611,2	65,5	51,3	–714,5	–559,8	0,7835
6	650,0	485,0	196,5	146,6	–453,5	–338,4	0,7462
7	520,0	369,6	196,5	139,6	–323,5	–229,9	0,7107
8	390,0	264,0	196,5	133,0	–193,5	–131,0	0,6768
9	260,0	167,6	262,0	168,9	2,0	1,3	0,6446
10	130,0	79,8	262,0	160,8	132,0	81,0	0,6139
11	–	–	262,0	153,2	262,0	153,2	0,5847
12	–	–	563,8	313,9	563,8	313,9	0,5568
13	–	–	563,8	299,0	563,8	299,0	0,5303

3.4 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8
14	–	–	563,8	284,7	563,8	284,7	0,5051
15	–	–	865,6	416,4	865,6	416,4	0,4810
16	–	–	865,6	396,5	865,6	396,5	0,4581
17	–	–	865,6	377,7	865,6	377,7	0,4363
18	–	–	1167,4	485,1	1167,4	485,1	0,4155
19	–	–	1167,4	462,0	1167,4	462,0	0,3957
20	–	–	1167,4	440,0	1167,4	440,0	0,3769
21	–	–	1469,3	527,4	1469,3	527,4	0,3589
22	–	–	1469,3	502,3	1469,3	502,3	0,3418
23	–	–	1469,3	478,3	1469,3	478,3	0,3256
24	–	–	1469,3	455,6	1469,3	455,6	0,3101
25	–	–	1469,3	433,9	1469,3	433,9	0,2953
26	–	–	1469,3	413,2	1469,3	413,2	0,2812
27	–	–	1469,3	393,5	1469,3	393,5	0,2678
28	–	–	1469,3	374,8	1469,3	374,8	0,2551
29	–	–	1469,3	356,9	1469,3	356,9	0,2429
30	–	–	1469,3	340,0	1469,3	340,0	0,2314
Iš viso:	7150,0	5923,5	24054,7	8814,9	16904,7	2891,5	
Dabartinė sąnaudų vertė (S), mln. Eur				5,9	N/S		1,5
Dabartinė naudos vertė (N), mln. Eur				8,8	VGN, %		7,7
GDV, mln. Eur				2,9	Diskonto norma, %		5,0

Gauta, kad sukuriamą ekonominę naudą dėl sąnaudų valstybinės reikšmės kelių priežiūrai (temperatūrinių plyšių užtaisymo darbams) sumažėjimo padengia ir viršija sąnaudas numatomas dėl kelių priežiūros, remonto ir rekonstravimo darbų pabrangimo (GDV – 8,8 mln. eurų). Kiti gauti SNA rodikliai yra taip pat geri ir grindžia algoritmo taikymo patrauklumą: VGN – 7,7 % ir N/S – 1,5. Algoritmo taikymo nauda pradedama gauti trečiais metais po algoritmo taikymo įdie-

gimo ir ekonominio atsipirkimo laikotarpis gana ilgas – 20 metų. Tik 21-ais metais priartėjama prie temperatūrinių plyšių užtaisymui valstybinės reikšmės kelių tinkle kasmet skiriamo finansavimo (apie 1,5 mln. eurų), nustatyto įvertinant valstybinės reikšmės kelių tinklo sudėtį ir kelių ilgį, dangų tipo pasiskirstymą, kelio dangos plotį, taisytinų plyšių vystymosi tendencijas bei plyšių užtaisymo kainas.

Netaikant bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo parenkant bitumą asfalto mišinio gamybai, 30 metų laikotarpyje valstybė patirtų apie 45 mln. eurų nuostolį. Šio algoritmo taikymas Lietuvoje parenkant bitumą asfalto mišinio gamybai lemia 38,4 % mažesnes išlaidas temperatūrinių plyšių remontui 30 metų laikotarpyje lyginant su įprastai taikoma bitumo parinkimo metodika bei įvertinant rinkos prisitaikymą prie pakitusių sąlygų. Algoritmo taikymo parenkant bitumą asfalto mišinio gamybai teikiamas ekonominis efektas gali skirtis priklausomai nuo valstybės.

### 3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Išanalizavus iš tiriamųjų kelių ruožų asfalto dangos viršutinio sluoksnio regeneruoto bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio po 60 s duomenis atsižvelgiant į tuose ruožuose nustatytą temperatūrinių plyšių intensyvumą gauta, kad temperatūrinių plyšių susidarymas ir vystymasis asfalto dangose apribojamas, kai bitumo įtempių relaksacijos modulis po 60 s yra ne didesnis kaip 52 MPa ir jo kitimo rodiklis ne mažesnis kaip 0,370 esant 10 °C aukštesnei temperatūrai nei bitumo taikymo vietovės regione užfiksuota žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra. Šios ribinės sąlygos įvertina KOS stotelėse nuotoliniu jutikliu DST111 (Vaisala) fiksuojamos temperatūros –3 °C nuokrypį. Tačiau šis nuokrypis turi būti patikslintas atliekant papildomus tyrimus. Bent vienos iš dviejų ribinių verčių viršijimas lemia didesnį nei 12 m/km (kelio dangos plotis – 9 m) temperatūrinių plyšių intensyvumą.
2. Taikant bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamą algoritmą asfalto dangos viršutinio sluoksnio mišinio gamybai naudotino bitumo parinkimui svarbu užtikrinti, kad nustatant įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklį, kuris yra relaksacijos modulio funkcijos pirmoji išvestinė, nebūtų analizuojami duomenys, kuomet nebuvo pasiektos numatytos deformacijos, ir kritinė temperatūra nebūtų apskaičiuojama ekstrapoliacijos būdu.
3. Siekiant apriboti temperatūrinių plyšių susidarymą ir vystymąsi asfalto dangose bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamas algoritmas turi būti taikomas asfalto dangos viršutinio sluoksnio

mišinio gamybai naudotino bitumo parinkimui nepriklausomai nuo numatytos statybos rūšies (nauja statyba, paprastasis remontas, kapitalinis remontas ar rekonstravimas).

4. Bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamas algoritmas užtikrina asfalto dangos funkcionavimą be temperatūrinių plyšių arba su minimaliu jų kiekiu tik jei bitumo žemiausia kritinė temperatūra, nustatyta pagal algoritme pateiktą metodiką, yra žemesnė nei žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra, užfiksuota numatytoje tiriamojo bitumo taikymo vietovėje per paskutinių 10–30 metų laikotarpį.
5. Žemiausiai asfalto dangos paviršiaus temperatūrai nustatyti sudarytas 2003–2018 m. KOS stotelėse užfiksuotų žemiausių asfalto dangos paviršiaus temperatūrų žemėlapis, kuris po kiekvienos žiemos turi būti peržiūrimas ir esant poreikiui patikslinamas atsižvelgiant į tą žiemą užfiksuotas žemiausias asfalto dangos temperatūras. Taip pat žemėlapi būtina patikslinti nustatčius nuotoliniu jutikliu DST111 (Vaisala) užfiksuotas temperatūros nuokrypį nuo faktinės asfalto dangos paviršiaus temperatūros atsižvelgiant į matuojamame plote esančią kelio dangos būklę (sausą, drėgną, šlapia, sniegą, kt.). Šio žemėlapio tikslumas tiesiogiai lemia tiriamojo bitumo įvertį.
6. Apskaičiuoti sąnaudų ir naudos analizės rodikliai (vidinė grąžos norma – 7,7 %, naudos ir sąnaudų santykis – 1,5) grindžia algoritmo taikymą valstybiniu mastu vertinti asfalto dangų atsparumą temperatūriniams plyšiams. Pabrėžtina, kad taikant sukurtą algoritmą gaunama nauda išauga nuo 65,5 tūkst. eurų (trejieji metai po įdiegimo) iki 1,5 mln. eurų (dvidešimt pirmieji metai po įdiegimo).
7. Bitumo įtempių relaksacijos modulių ir jo kitimo rodikliu grindžiamo algoritmo taikymas parenkant bitumą asfalto dangos viršutinio sluoksnio mišinio gamybai lemia 38,4 % mažesnes išlaidas temperatūrinių plyšių remontui 30 metų laikotarpyje lyginant su įprastai taikoma bitumo parinkimo metodika.





---

## Bendrosios išvados

1. Sukurtas teorinis algoritmas vertinti asfalto dangų atsparumą temperatūriams plyšiams yra pagrįstas bitumo žemiausios kritinės temperatūros nustatymu remiantis bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio ribinėmis vertėmis po 60 s. Teorinis algoritmas apima tiesioginį bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio nustatymą atliekant bitumo įtempių relaksacijos bandymą dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens bandiniu ne mažiau kaip dvejose neigiamose temperatūrose.

2. Įrodyta, kad bitumo įtempių relaksacijos bandymu nustatant tiesiškai tampriai klampaus būvio ribas negalima taikyti pakopinio bandinio deformavimo, nes jau po pirmojo apkrovimo bandinyje susiformuoja liekamosios deformacijos. Todėl bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos turi būti nustatomos atliekant pakartotinius bitumo įtempių relaksacijos bandymus kiekvienam deformacijų lygmeniui paruošiant naują bandinį. Bituminių rišiklių tiesiškai tampriai klampaus būvio riba neigiamose temperatūrose pasireiškia staigiu bandinio suirimu, lemiančiu ženkliai (daugiau nei 3 kartais lyginant su išmatuotų verčių vidurkiu) mažesnę bitumo įtempių relaksacijos modulio vertę nepriklausomai nuo bandymo temperatūros ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ar  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ir bituminio rišiklio rūšies. Toks bituminio rišiklio funkcionavimas (staigus bandinio suirimas) nėra būdingas esant aukštomis ( $\geq 46\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ir vidutinėmis (nuo  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) bandymo temperatūroms.

3. Atlikta regeneruoto bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio po 60 s sąryšio analizė su temperatūrinių plyšių intensyvumu tiriamuosiuose kelių ruožuose parodė, kad temperatūrinių plyšių susidarymas ir vystymasis asfalto dangose apriojamas, kai bitumo, taikomo asfalto dangos viršutinio sluoksnio mišinio gamybai, įtempių relaksacijos modulis ir jo kitimo rodiklis po 60 s atitinkamai yra ne didesnis kaip 52 MPa ir ne mažesnis kaip 0,370 esant 10 °C aukštesnei temperatūrai nei bitumo taikymo vietovės regione užfiksuota žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra. Bent vienos ribinės vertės viršijimas lemia temperatūrinių plyšių susidarymą.

4. Pagal eksperimentinio tyrimo rezultatus patikslintas algoritmas yra skirtas asfalto dangos viršutinio sluoksnio mišinio gamybai naudotino bitumo parinkimui nepriklausomai nuo numatytos statybos rūšies (nauja statyba, paprastas remontas, kapitalinis remontas ar rekonstravimas). Pasiūlytas algoritmas užtikrina asfalto dangų funkcionavimą be temperatūrinių plyšių susidarymo ir vystymosi tik tuo atveju, jei nustatyta bitumo kritinė temperatūra yra ne didesnė nei žemiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra.

5. Atlikus ekonominio efekto skaičiavimus nustatyta, kad lyginant su įprastai taikoma bitumo parinkimo praktika algoritmo taikymas lemia iki 40 % mažesnes išlaidas asfalto dangų temperatūrinių plyšių remontui 30 metų laikotarpyje. Algoritmo taikymo valstybiniu mastu prasmingumą grindžia apskaičiuoti sąnaudų ir naudos analizės rodikliai: vidinė gražos norma – 8 % bei naudos ir sąnaudų santykis – 1,5.

---

## Rekomendacijos

1. Rekomenduojama bitumo atsparumą temperatūrinių plyšių susidarymui ir vystymuisi vertinti pagal bitumo įtempių relaksacijos modulį ir jo kitimo rodiklį po 60 s atliekant įtempių relaksacijos bandymą dinaminio šlyties reometru su 4 mm skersmens bandiniu neigiamoje temperatūroje ir nustatant žemiausią kritinę temperatūrą. Šio metodo taikymas įgalintų bitumo elgsenos charakterizavimą visoje eksploatacinių temperatūrų apimtyje naudojant vieną prietaisą – dinaminį šlyties reometrą.

2. Rekomenduojama Lietuvos automobilių kelių direkcijai prie Susisiekimo ministerijos į normatyvinį techninį dokumentą „Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės“ IT ASFALTAS 08 įtraukti reikalavimą, kad vykdant asfalto viršutinio sluoksnio mišinio gamybai taikomo bitumo kontrolinius bandymus privaloma nustatyti bitumo žemiausią kritinę temperatūrą vadovaujantis sukurto algoritmu. Nustatyta bitumo žemiausia kritinė temperatūra turėtų būti deklaruojama. Tai leistų surinkti informaciją apie rinkoje esamų ir asfalto viršutiniam sluoksniui įrengti taikomų bitumų atsparumą temperatūrinių plyšių susidarymui ir vystymuisi.



---

## Literatūra ir šaltiniai

Anderson, D. A.; Kennedy, T. 1993. Development of SHRP binder specification, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 62: 481–507.

Anderson, D.; Dongre, R. 1995. The SHRP direct tension specification test-its development and use, *Physical Properties of Asphalt Cement Binders*: 51–66. <https://doi.org/10.1520/STP18188S>

Anderson, D.; Lapalu, L.; Marasteanu, M.; Hir Y.; Planche, J. P.; Martin, D. 2001. Low-temperature thermal cracking of asphalt binders as ranked by strength and fracture properties, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1766: 1–6. <https://doi.org/10.3141/1766-01>

Andriescu, A.; Hesp, S. A. M.; Youtcheff, J. 2004. Essential and plastic works of ductile fracture in asphalt binders, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1875: 1–7. <https://doi.org/10.3141/1875-01>

Andriescu, A.; Simon A. M. Hesp. 2009. Time-temperature Superposition in Rheology and Ductile Failure of Asphalt Binders, *International Journal of Pavement Engineering* 10(4):229–40. <https://doi.org/10.1080/10298430802169440>

Anton Paar. 2014. Extended Application Report: Measurement of Glycerol in the glassy state. Investigation and correction of instrument radial compliance.

Anton Paar. 2018. Temperature Measuring Sets. Reference Guide. Document number C92IB031EN-D.

Apeageyi, A. K.; Buttlar, W. G.; Reis, H. 2009. Assessment of Low-Temperature Embrittlement of Asphalt Binders Using an Acoustic Emission Approach, *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 51(3): 129–136. <https://doi.org/10.1784/insi.2009.51.3.129>

ASTM C670–15. 2015. *Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials*, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania. 9 p. <https://doi.org/10.1520/C0670-15>

Baglieri, O.; Dalmazzo, D.; Barazia, M.; Tabatabaee, H. A.; Bahia, H. U. 2012. Influence of Physical Hardening on the Low-Temperature Properties of Bitumen and Asphalt Mixtures, *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 53: 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.901>

Bahia, H. U.; Tabatabaee, H.; Velasquez, R. 2012a. Asphalt Thermal Cracking Analyser (ATCA), in *Proc. of the 7<sup>th</sup> RILEM International Conference on Cracking in Pavements*. RILEM Book-series, Vol. 4 Ed. by Scarpas A., Kringos N., Al-Qadi I., A. L., 20–22 June, 2012, Delft, Netherlands. Dordrecht: Springer, 147–156. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_15)

Bahia, H. U.; Tabatabaee, H.; Velasquez, R. 2012b. Importance of Bitumen Physical hardening for Thermal Stress Buildup and Relaxation in Asphalt, in *Proc. of the 5<sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 13–15 June, 2012, Istanbul, Turkey, 1–10.

Bahia, H. U.; Velasquez, R.; Tabatabaee, H. A.; Puchalski, S. 2012. Role of asphalt binder fracture properties in thermal cracking performance of mixtures and pavements, in *57<sup>th</sup> Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*: 18–21 November 2012, Vancouver British Columbia, Canada.

Behnia, B. 2013. An Acoustic Emission-based Test to Evaluate Low Temperature Behavior of Asphalt Materials. PhD Thesis. Dept of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, Illinois, USA. 196 p. Available from the Internet: <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/45584>.

Behnia, B.; Buttlar, W. G.; Reis, H.; Apeageyi, A. K. 2010. Determining the embrittlement temperature of asphalt binders using an acoustic emission approach, in *NDE/NDT for Highways & Bridges: Structural Materials Technology (SMT) Conference*, 16–20 August 2010, New York, the United States.

Behnia, B.; Dave, E. V.; Buttlar, W. G.; Reis, H. 2016. Characterization of embrittlement temperature of asphalt materials through implementation of acoustic emission technique, *Construction and Building Materials* 111: 147–152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.105>

Behnia, B.; Dave, E.; Ahmed, S.; Buttlar W.; Reis, H. 2011. Effects of Recycled Asphalt Pavement Amounts on Low-Temperature Cracking Performance of Asphalt Mixtures Using Acoustic Emissions, *Transportation Research Record* 2208: 64–71. <https://doi.org/10.3141/2208-09>

- Bhurke, A.; Shin, E.; Drzal, L. 1997. Fracture Morphology and Fracture Toughness Measurement of Polymer-Modified Asphalt Concrete, *Transportation Research Record* 1590: 23–33. <https://doi.org/10.3141/1590-04>
- Bouldin, M. G.; Dongré, R. N.; Rowe, G. M.; Sharrock, M. J.; Anderson, D. A. 2000. Predicting thermal cracking of pavements from binder properties: theoretical basis and field validation, *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* 69: 455–496.
- Bouldin, M. G.; Dongré, R. N.; Sharrock, M. J.; Rowe, G.; Anderson, D. A.; Marasteanu, M. O.; Dunn, L.; Zanzotto, L.; Kluttz, R. Q. 1999. *A comprehensive evaluation of the binders and mixtures placed on the Lamont test sections*. Federal Highway Administration, Washington DC, USA.
- Boutin, G.; Lupien, C. 2000. Thermal Cracking of Asphalt Pavement, in *2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress*. Barcelona. 45–59.
- Buttlar, W. G.; Behnia, B.; Reis, H. 2011. *An Acoustic Emission- Based Test to Determine Asphalt Binder and Mixture Embrittlement Temperature*. Final Report for NCHRP-IDEA Project 144. Urbana-Champaign: University of Illinois. 47 p.
- Buttlar, W.; Roque, R. 1994. Development and Evaluation of the Strategic Highway Research Program Measurement and Analysis System for Indirect Tensile Testing at Low Temperatures, *Transportation Research Record* 1454: 163–171.
- Christensen, D. W.; Bonaquist, R. F. 2004. *Evaluation of Indirect Tensile Test (IDT) Procedures for Low-Temperature Performance of Hot Mix Asphalt*. NCHRP Report No. 530, National Cooperative Highway Research Program. 52 p.
- Deme, I. J.; Young, F. D. 1987. *Saint Anne Test Road Revisited Twenty Years Later*. Report SM/M/89/172. Toronto: Shell Canada Products Company.
- Dongré, R. N.; Button, J.; Kluttz, R.; Anderson, D. 1997. *Evaluation of superpave binder specification with performance of polymer-modified asphalt pavements* in R. Jester (Eds). Progress of Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement): Evaluation and Implementation. American Society for Testing and Materials: 80–100. <https://doi.org/10.1520/STP12081S>
- Dongré, R. N.; D'Angelo, J. 1998. Effect of new direct tension test protocol on the superpave low temperature specification for bitumen binders in *5th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields (BCRA)*, 6–8 July 1998, Trondheim, Norway.
- Falchetto, A. C.; Marasteanu, M. O.; Balmurugan, S.; Negulescu, I. I. 2014. Investigation of Asphalt Mixture Strenght at Low Temperatures with the Bending Beam Rheometer, *Road Materials and Pavement Design* 15(suppl 1): 28–44. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.926618>
- Falchetto, A. C.; Turos, M.; Marasteanu, M. O. 2012. Investigation on asphalt binder strength at low temperatures. *Road Materials and Pavement Design* 13 (4): 804–816. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.735793>
- Farrar, M. J., Kim, S.-S., Pauli, T., & Planche, J. P. 2016. An Advanced Low Temperature Rheological and Fracture Test Method for Bitumen Purchase Specifications and Pavement

Performance Prediction: 4-mm DSR/ABCD, *In RILEM Bookseries* 11: 25–36. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3_3)

Farrar, M. J.; Sui, C.; Salmans, S.; Qin, Q. 2015. *Determining the low-temperature rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR)*. Western Research Institute, Laramie, Wyoming, the United States.

Farrar, M. J.; Salmans, S. L.; Planche, J. 2013. Recovery and Laboratory Testing of Asphalt Emulsion Residue, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2370(1): 69–75. <https://doi.org/10.3141/2370-09>

Fraass, A. 1937. Test Methods for bitumen and bituminous mixture with specific reference to low temperature, *Bitumen*: 152–155.

Guo, Z. K.; Kobayashi A. S.; Hawkins, N. M. 1995. Dynamic Mixed Mode Fracture of Concrete, *International Journal of Solids and Structures* 32(17–18): 2591–2607. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(94\)00284-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)00284-4)

Haas, R.; Meyer, F.; Assaf, G; Lee, H. 1987. A comprehensive study of cold climate airport pavement cracking, in *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists* 56: 198–245.

Hallin, J. P. 2004. *Development of 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures: Phase II. NCHRP 1-37A*, Washington, DC, USA: National Cooperative Highway Research Program.

Hesp, S. A. M. 2003. *An improved low-temperature asphalt binder specification method*. Final Report, NCHRP-IDEA Contract 84 and Ministry of Transportation.

Hesp, S. A. M. 2004. *Development of a fracture mechanics-based asphalt binder test method for low temperature performance prediction*. Highway IDEA Project 84. Transportation Research Board on the National Academies.

Hesp, S. A. M.; Genin, S. N.; Scafe D.; Shurvell, H. F.; Subramani, S. 2009a. Five year performance review of a northern Ontario pavement trial: validation of Ontario's double-edge-notched tension (DENT) and extended bending beam rheometer (BBR) test methods, in *the 54th Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*, November 2009, Moncton, New Brunswick, Canada.

Hesp, S. A. M.; Soleimani, A.; Subramani, S.; Phillips, T.; Smith, D.; Marks, P.; Tam, K. K. 2009b. Asphalt pavement cracking: analysis of extraordinary life cycle variability in eastern and northeastern Ontario, *International Journal of Pavement Engineering* 10(3): 209–227. <https://doi.org/10.1080/10298430802343169>

Hesp, S.A.M.; Subramani, S. 2009. Another look at the bending beam rheometer for specification grading of asphalt cements, in *6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6)*, 8–10 July, Turin, Italy.

Ho, C.; Romero, P. 2011. Using Asphalt Mixture Beams in the Bending Beam Rheometer, *Road materials and Pavement Design* 12(2): 293–314.



- Hoare, T. R.; Hesp, S. A. M. 2000. Low-temperature fracture testing of asphalt binders: regular and modified systems, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1728: 36–42. <https://doi.org/10.3141/1728-06>
- Hofman, R.; Oosterban, E.; Erkens, S. M.; van der Kooij, J. 2003. Semi-Circular Bending Test to Assess the Resistance Against Crack Growth, in *Proc. of the 6<sup>th</sup> RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials*, 14–16 April, 2003, Zurich, Switzerland, 257–263.
- Iliuta, S.; Hesp, S. A. M.; Marasteanu, M.; Masliwec, T.; Tam, K. K. 2004. Field validation study of low-temperature performance grading tests for asphalt binders, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1875: 14–21. <https://doi.org/10.3141/1875-03>
- Isacsson, U.; Zeng, H. 1998a. Cracking of Asphalt at Low Temperature as Related to Bitumen Rheology, *Journal of Materials Science* 33(8): 2165–2170. <https://doi.org/10.1023/A:1004383506240>
- Isacsson, U.; Zeng, H. 1998b. Low-Temperature Cracking of Polymer-Modified Asphalt, *Materials and Structures* 31(1): 58–63. <https://doi.org/10.1007/BF02486415>
- Jayatilaka, A. de S. 1979. *Fracture of Engineering Brittle Materials*. Applied Science Publishers. p.?
- Jellema, E.; Scholten, E.; Vries, S. De; Kim, S. S., Kluttz, B. 2012. Comparing cold performance results using fracture toughness test, asphalt binder cracking device, Fraass breaking point and bending beam rheometer, in *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 13–15 June 2012, Istanbul, Turkey.
- John, R; Shah, S. P. 1990. Mixed-Mode Fracture of Concrete Subjected to Impact Loading, *Journal of Structural Engineering* 116(3): 585–602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:3\(585\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:3(585))
- Jones, Z.; Romero, P.; VanFrank, K. 2014. Development of Lowtemperature Performance Specifications for Asphalt Mixtures using the Bending Beam Rheometer, *Road Materials and Pavement Design* 15(3): 574–587. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.908135>
- Jung, D. H.; Vinson, T. S. 1993. Low Temperature Cracking Resistance of Asphalt Concrete Mixtures, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 62: 54–92.
- Jung, D. H.; Vinson, T. S. 1994. *Low-Temperature Cracking: Test Selection*. SHRP-A-400, Washington, DC, USA: Strategic Highway Research Program. National Research Council.
- Kim, K. W.; El Hussein, M. 1997. Variation of Fracture Toughness of Asphalt Concrete under Low Temperatures, *Construction and Building Materials* 11(7–8): 403–411. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00030-5)
- Kim, S. S. 2005. Direct measurement of asphalt binder thermal cracking, *Journal of Materials in Civil Engineering* 17(6): 632–639. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:6\(632\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:6(632))

- Kim, S. S.; Wargo, A.; Powers, D. 2009. *A Simple Test Procedure for Evaluating Low Temperature Cracking Resistance of Asphalt Concrete*. Final Report FHWA/OH-2009/5, Ohio Dept of Transportation.
- Kim, S. S.; Wargo, A.; Powers, D. 2010. Asphalt Concrete Cracking Device to Evaluate Low Temperature Performance of HMA, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 79: 157–188.
- Kim, S. S.; Wysong, Z.; Kovach, J. 2006. Low-temperature thermal cracking of asphalt binder by asphalt binder cracking device, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1962: 28–35. <https://doi.org/10.3141/1962-04>
- Kim, Y. R. 2009. *Modeling of Asphalt Concrete*. American Society of Civil Engineers. ISBN 9780071464628. 460 p.
- Kluttz, R. Q.; Dongré, R. N.; 1997. Effect of SBS polymer modification on the low-temperature cracking of asphalt pavements, in A. M. Usmani. (Ed.). *Asphalt Science and Technology*: 217–233.
- KPT SDK 19. 2019. *Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės*. Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. 39 p.
- KPV DT-15. 2015. *Kelių priežiūros vadovas. II dali: automobilių kelių priežiūros darbų atlikimo technologija*. Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. 107 p.
- Lee, N.; Hesp, S. A. M. 1994. Low temperature fracture toughness of polyethylene-modified asphalt binders, *Transportation Research Record* 1436: 54–59.
- Li, X., Braham A. F.; Marasteanu, M. O.; Buttlar, W. G.; Williams, R. C. 2008. Effect of Factors Affecting Fracture Energy of Asphalt Concrete at Low Temperature, *Road Materials and Pavement Design* 9(suppl 1): 397–416. <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690176>
- Li, X.; Marasteanu, M. 2004. Evaluation of the Low Temperature Fracture Resistance of Asphalt Mixtures Using the Semi-Circular Bend Test, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 73: 401–426.
- Li, X.; Zofka, A.; Marasteanu, M.; Clyne, T. R. 2006. Evaluation of field aging effects on asphalt binder properties, *Road Materials and Pavement Design* 7(1): 57–73. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690058>
- LST CEN/TS 15963:2014. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumo trūkimui temperatūros nustatymas atliekant įpjauto strypo tritaškio lenkimo bandymą [Bitumen and bituminous binders – Determination of the fracture toughness temperature by a three point bending test on a notched specimen], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.
- LST EN 12607-1:2015. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumo kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, nustatymas. 1 dalis. RTFOT metodas [Bitumen and bituminous binders – Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air – Part 1: RTFOT method], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12697-1:2012. Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 1 dalis. Tirpiojo rišiklio kiekis [Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 1: Soluble binder content], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12697-3:2013. Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 3 dalis. Bitumo regeneravimas sukiuoju garintuvu [Bituminous mixtures – Test methods – Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 14769:2012. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Pagreitinintas ilgalaikis sendinimas naudojant slėginį sendinimo indą (PAV) [Bitumen and bituminous binders – Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV)], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 14770:2012. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo nustatymas. Dinaminis šlyties reometras (DSR) [Bitumen and bituminous binders – Determination of complex shear modulus and phase angle – Dynamic Shear Rheometer (DSR)], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 14771:2012. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Lenkimo standžio nustatymas. Lenkiamo strypelio reometras (BBR) [Bitumen and bituminous bending – Determination of the flexural creep stiffness – Bending Beam Rheometer (BBR)], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

Lu, X.; Isacsson, U. 2000. Laboratory study on the low temperature physical hardening of conventional and polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials* 14(2): 79–88. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00012-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00012-X)

Lu, X.; Isacsson, U. 2001. Effect of Binder Rheology on the Low-Temperature Cracking of Asphalt Mixtures, *Road Materials and Pavement Design* 2(1): 29–47.

Lytton, R. L.; Uzan, J.; Fernando, E. G.; Roque, R.; Hiltunen, D.; Stoffels, S. M. 1993. *Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixes*. Report SHRP-A-357, Washington, D.C., USA.

Maji, A.K.; Ouyang, C.; Shah, S.P. 1990. Fracture mechanisms of quasi-brittle materials based on acoustic emission, *Journal of Materials Research*: 5(1): 206–217. <https://doi.org/10.1557/JMR.1990.0206>

Mandal, T.; Hanz, A. J.; Bahia, H. U. 2017. Challenges in Using Disc Compact Tension Test to Investigate Effect of Asphalt Mix Design Variables at Low Temperatures, in *Proc. of the Transportation Research Board 96<sup>th</sup> Annual Meeting*, 8–12 January, 2017, Washington, D.C.

Marasteanu, M. O. 2004. Role of bending beam rheometer parameters in thermal stress calculations, *Transportation Research Record* 1875(1): 9–13. <https://doi.org/10.3141/1875-02>

Marasteanu, M. O.; Basu, A. 2004. Stiffness *m*-value and the low temperature relaxation properties of asphalt binders, *Road Materials and Pavement Design* 5(4): 121–131. <https://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689966>

- Marasteanu, M. O.; Basu, A.; Hesp S. A. M.; Voller, V. 2004. Time-temperature superposition and AASHTO MP1a critical temperature for low-temperature cracking, *International Journal of Pavement Engineering* 5(1): 31–38. <https://doi.org/10.1080/10298430410001720792>
- Marasteanu, M. O.; Buttlar, W.; Bahia, H.; Williams, C. 2012a. *Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements*. National Pooled Fund Study - Phase II. Report No. MN/RC 2012-23.
- Marasteanu, M. O.; Cannone Falchetto, A.; Turos, M.; Le, J. 2012b. *Development of a simple test to determine the low temperature strength of asphalt mixtures and binders*. IDEA Program Final Report No. NCHRP-151.
- Marasteanu, M. O.; Dai, S.; Labuz, J.; Li, X. 2002. Determining the Low-Temperature Fracture Toughness of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record* 1789: 191–199. <https://doi.org/10.3141/1789-21>
- Marasteanu, M.; Falchetto, A. C.; Velasquez, R.; Le, J. L. 2016. On the Representative Volume Element of Asphalt Concrete at Low Temperature, *Mechanics of Time-Dependent material* 20(3): 343–366. <https://doi.org/10.1007/s11043-016-9302-3>
- Marasteanu, M.; Zofka, A.; Turos, M.; Li, X.; Velasquez, R.; Li, X.; Buttlar, W.; Paulino, G.; Braham, A.; Dave, E.; Ojo, J.; Bahia, H.; Williams, Ch.; Bausano, J.; Gallistel, A.; McGraw, J. 2007. *Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements*. National Pooled Fund Study 776. Report No. MN/RC 2007-43. Minnesota Dept of Transportation. 262 p.
- Marasteanu, M.; Zofka, A.; Turos, M.; Li, X.; Velasquez, R.; Li, X.; Buttlar, W. 2012. *Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements*. National Pooled Fund Study -Phase II. Report No. MN/RC 2012-23. Minnesota Dept of Transportation. 323 p.
- Moavenzadeh, F. 1967. Asphalt Fracture, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist* 36: 51–72.
- Mobasher, B.; Mamlouk, M. S.; Lin, H. M. 1997. Evaluation of Crack Propagation Properties of Asphalt Mixtures, *Journal of Transportation Engineering* 123(5): 405–413. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1997\)123:5\(405\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1997)123:5(405))
- Molenaar, J. M. M.; Molenaar, A. A. A. 2000. Fracture Toughness of Asphalt in the Semi-Circular Bend Test, in *Proc. of the 2<sup>nd</sup> Euroasphalt and Eurobitume Congress*, 20–22 September, 2000, Barcelona, Spain. 509–517.
- Monismith, C. L.; Secor, G. A.; Secor, K. E. 1965. Temperature Induced Stresses and Deformations in Asphalt Concrete, in *Proc. of Association of Asphalt Paving Technologists* 248–285.
- Ou Zhao, M.; Hesp, S. A. M. 2006. Performance grading of the Lamont, Alberta C-SHRP pavement trial binders, *International Journal of Pavement Engineering* 7(3): 199–211. <https://doi.org/10.1080/10298430600715667>
- Perez-Jimenez, F. E.; Botella, R.; Moon, K. H.; Marasteanu, M. 2013. Application of Semicircular Bend and Fenix Tests for Assessing Effect of Load Application Time and

Temperature on Fracture Energy of Asphalt Mixtures, in *Proc of the Transportation Research Board 92<sup>nd</sup> Annual Meeting*, 13–17 January, 2013, Washington, D.C. 1–12.

Perez-Jimenez, F.; Gonzalo, V.; Rodrigo, M.; Adriana, M.; Ramon, B. 2010. Fenix Test: Development of a New Test Procedure for Evaluating Cracking Resistance in Bituminous Mixtures, *Transportation Research Record* 2181: 36–43. <https://doi.org/10.3141/2181-05>

Petersen, J. C.; Robertson, R. E.; Branthaver J. F.; Harnsberger, P. M.; Duvall, J. J.; Kim, S. S.; Anderson, D. A.; Christiansen, D. W.; Bahia, H. U.; Dongre, R.; Antle, C. E.; Sharma, M. G.; Button, J. W.; Glover, C. J. 1994. *Binder characterisation and evaluation*, Vol. 4: test methods. SHRP-A-370. Strategic Highway Research Program. National Research Council, Washington, D.C., USA.

Ponniah, J. E.; Hesp, S. A. M. 1996. Use of fracture energy in performance-based specifications of asphalt binders, in *the 41st Annual Conference of Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*, 17–20 November 1996, Edmontal, Alberta, Canada.

R PT 11. 2011. *Asfalto dangų plyšių, siūlių ir prijungčių su defektais taisymo rekomendacijos*. Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. 13 p.

Radziszewski, P.; Kowalski, K. J.; Król, J. B.; Sarnowski, M.; Piłat, J. 2014. Quality assessment of bituminous binders based on the viscoelastic properties: Polish experience, *Journal of Civil Engineering and Management* 20(1): 111–120. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.843586>

Readshaw, E. E. 1972. Asphalt specifications in british columbia for low temperature performance, *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*: 562–581.

Riccardi, C.; Cannone, A.; Wistuba, M.; Losa, M. 2017. Comparison of DSR and BBR tests for determining the Performance Grade (PG) of asphalt binder at low temperature, in *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*: 267–271. <https://doi.org/10.1201/9781315100333-39>

Riccardi, C.; Falchetto, A. C.; Wang, D.; Wistuba, M. P. 2017. Effect of cooling medium on low-temperature properties of asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design* 18: 234–255. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389072>

Robertson, W. D. 1987. Selection of paving asphalt cements for low temperature service, *Paving in Cold Area. Mini workshop* 3 1: 41–84.

Roireau, M. 1986. *Scellement des Fissures dans les Pavages de Béton Bitumineux*.

Romero, P.; Masad, E. 2001. Relationship between the Representative Volume Element and Mechanical Properties of Asphalt Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* 13(1): 77–84. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:1\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:1(77))

Roque, R.; Hiltunen, D. R.; Stoffels, S. M. 1993. Field validation of SHRP asphalt binder and mixture specification tests to control thermal cracking through performance modeling, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 62: 615–638.

Roque, R.; Buttlar, W. G. 1992. The Development of a Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Mode, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist* 61: 304–328.

- Roy, S. D.; Hesp, S. A. M. 2001. Fracture energy and critical crack tip opening displacement: fracture mechanics- based failure criteria for low-temperature grading of asphalt binders, in *the 46st Annual Conference of Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*, November 1996, Toronto, Ontario, Canada.
- Shahin, M. Y.; McCullough, B. F. 1972. *Prediction of low-temperature and thermal fatigue cracking in flexible pavements*. Research report No. 123-14.
- Shenoy, A. 2002. Single-event cracking temperature of asphalt pavements directly from bending beam rheometer data, *Journal of Transportation Engineering* 128(5): 465–471. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:5\(465\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:5(465))
- Sui, C.; Farrar, M. J.; Harnsberger, P. M.; Tuminello, W. H.; Turner, T. F. 2011. New low-temperature performance-grading method, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2207: 43–48. <https://doi.org/10.3141/2207-06>
- Sui, C.; Farrar, M.; Tuminello, W.; Turner, T. 2010. New technique for measuring low-temperature properties of asphalt binders with small amounts of material, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2179: 23–28. <https://doi.org/10.3141/2179-03> b
- Tabatabaee, H.; Velasquez, R.; Bahia, H. 2012. Modeling Thermal Stress in Asphalt Mixtures Undergoing Glass Transition and Physical Hardening, *Transportation Research Record* 2296: 106–114. <https://doi.org/10.3141/2296-11>
- Tschoegl, N. W. 1989. *The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior: an Introduction*. 769 p.
- Velasquez, R., & Bahia, H. 2013. Critical factors affecting thermal cracking of asphalt pavements: towards a comprehensive specification, *Road Materials and Pavement Design* 14(sup1): 187–200. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.774755>
- Velásquez, R.; Labuz, J. F.; Marasteanu, M.; Zofka, A. M. 2009. Revising Thermal Stresses in the TSRST for low-Temperature Cracking Prediction, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(11): 680–687. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:11\(680\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:11(680))
- Velasquez, R.; Tabatabaee, H.; Bahia, H. 2011. Low temperature cracking characterization of asphalt binders by means of the single-edge notch bending (SENB) test, *Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists* 80: 583–614.
- Vinson, T. S.; Janoo, V. C.; Haas, C. G. 1989. *Low Temperature and Thermal Fatigue Cracking*, SHRP Summary Report No. A-003A, Washington, DC, USA.
- Wagoner, M. P.; Buttlar, W. G. 2007. Influence of Specimen Size in Fracture Energy of Asphalt Concrete, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 76: 391–426.
- Wagoner, M. P.; Buttlar, W. G.; Paulino, G. H. 2005a. Development of a Single-Edge Notched Beam Test for Asphalt Concrete Mixtures, *Journal of Testing and Evaluation* 33(6): 1–9. <https://doi.org/10.1520/JTE12579>

- Wagoner, M. P.; Buttlar, W. G.; Paulino, G. H. 2005b. Disk-Shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture, *Experimental Mechanics* 45(3): 270–277. <https://doi.org/10.1177/0014485105053205>
- Ward, I. M.; Sweeney, J. 2012. *Mechanical Properties of Solid Polymers*: third edition. 476 p. <https://doi.org/10.1002/9781119967125>
- Weissman, S.; Harvey, J.; Sackman, J.; Long, F. 1999. Selection of Laboratory Test Specimen Dimension for Permanent Deformation of Asphalt Concrete Pavements, *Transportation Research Record* 1681: 113–120. <https://doi.org/10.3141/1681-14>
- Zofka, A., Marasteanu, M. 2007. Development of double edge notched tension (DENT) test for asphalt binders, *Journal of Testing and Evaluation* 35(3): 100678. <https://doi.org/10.1520/JTE100678>
- Zofka, A.; Braham, A. 2009. Comparison of Low-Temperature Field Performance and Laboratory Testing of 10 Test Sections in the Midwestern United States, *Transportation Research Record* 2127: 107–114. <https://doi.org/10.3141/2127-13>
- Zofka, A.; Marasteanu, M.; Li, X.; Clyne, T.; McGraw, J. 2005. Simple Method to Obtain Asphalt Binders Low Temperature Properties from Asphalt Mixtures Properties, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 74: 255–282.
- Zofka, A.; Marasteanu, M.; Turos, M. 2008a. Determination of Asphalt Mixture Creep Compliance at Low Temperatures by Using Thin Beam Specimens, *Transportation Research Record* 2057: 134–139. <https://doi.org/10.3141/2057-16>
- Zofka, A.; Marasteanu, M.; Turos, M. 2008b. Investigation of Asphalt Mixture Creep Compliance at Low Temperatures, *Road Materials and Pavement Design* 9(suppl 1): 269–285.





---

## Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

### Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Vaitkus, A.; Gražulytė, J.; Šernas, O.; Vorobjovas, V.; Kleizienė, R. 2019. An algorithm for the use of MSWI bottom ash as a building material in road pavement structural layers, *Construction and building materials*. 212: 456–466. ISSN 0950-0618 (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 4,046).

Gražulytė J.; Soenen H.; Blom J.; Vaitkus A.; Židanavičiūtė J.; Margaritis A. 2019. Analysis of 4-mm DSR tests: calibration, sample preparation, and evaluation of repeatability and reproducibility. *Road materials and pavement design*. 1–15. ISSN 1468-0629. (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 1,980).

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Tuminienė, F.; Gražulytė, J.; Čygas, D. 2018b. Soft asphalt and double Otta Seal – self-healing sustainable techniques for low-volume gravel road rehabilitation, *Sustainability*. 10(1): 1–11. ISSN 2071-1050. (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 2,075).

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Kleizienė, R.; Šernas, O.; Gražulytė, J. 2017a. Modified asphalt mixtures for heavy duty pavement wearing layers, *Construction and building materials*. 131: 503–511. ISSN 0950-0618. (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 3,485).

Gražulytė, J.; Vaitkus, A.; Andrejevas, V.; Gribulis, G. 2017. Methods and criteria for evaluation of asphalt mixture resistance to low temperature cracking, *The Baltic Journal*

*of Road and Bridge Engineering*. 12(2): 135–144. ISSN 1822-427X (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 0,622).

Vaitkus, A.; Gražulytė, J.; Skrodenis, E.; Kravcovas, I. 2016a. Design of frost resistant pavement structure based on road weather stations (RWSs) data, *Sustainability*. 8(12): 1–13. ISSN 2071-1050. (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 1,789).

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Tuminienė, F.; Gražulytė, J. 2016b. Performance of soft asphalt and double Otta Seal within first three years, *Advances in materials science and engineering*. 2016: 1–12. ISSN 1687-8434. (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 1,299).

### **Straipsniai kituose leidiniuose**

Vaitkus, A.; Andriejauskas, T.; Gražulytė, J.; Šernas, O.; Vorobjovas, V.; Kleizienė, R. 2018c. Qualitative criteria and thresholds for low noise asphalt mixture design, in *IOP conference series: Materials science and engineering. Resilient and safe road infrastructure*, 8–9 May 2018, Kielce, Poland. p. 1–8. ISSN 1757-899X.

Vaitkus, A.; Čygas, D.; Gražulytė, J.; Andrejevas, V.; Kravcovas, I. 2018d. Comparative analysis of cold central-plant recycled and unbound base course bearing capacity, in *Proceedings of 7th transport research arena (TRA 2018)*, 16-19 April 2018, Vienna, Austria, p. 1–9.

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Tuminienė, F.; Gražulytė, J. 2016c. Experience in rehabilitation of low-volume roads using soft asphalt and Otta seal technologies, in *Transportation research procedia. Transport Research Arena TRA2016*, April 18–21, p. 2441–2448. ISSN 2352-1465.

Gražulytė, J.; Vaitkus, A.; Kravcovas, I. 2016. Bitumen selection approach assessing its resistance to Low temperature cracking, in *CETRA 2016 : proceedings of the 4<sup>rd</sup> international conference on road and rail infrastructures*, 23–25 May, Šibenik, Croatia. p. 643–649. ISSN 1848-9842.

Gražulytė, J.; Vaitkus, A. 2017. Analysis of methods and criteria for evaluation of bitumen performance at low temperatures, in *10<sup>th</sup> International conference "Environmental Engineering"*, 27-28 April, Vilnius, Lithuania. p. 1–8. eISSN 2029-7092.

Vaitkus, A.; Gražulytė, J.; Juknevičiūtė-Žilinskienė, L.; Andrejevas, V. 2017b. Review of Lithuanian experience in asphalt pavements cold recycling, in *10<sup>th</sup> International conference "Environmental Engineering"*, 27–28 April 2017, Vilnius, Lithuania. p. 1–8. eISSN 2029-7092.

---

# Summary in English

## Introduction

### Problem formulation

Performance of asphalt pavements depends on the bitumen characteristics. An inappropriate selection of the bitumen leads to the formation of critical stresses in an asphalt pavement. These result in the opening of low temperature cracks, which are one of the most significant distress leading to faster asphalt pavement deterioration.

The low temperature cracks that form and develop in the asphalt pavement lead to a decrease in the pavement's smoothness, and the latter results in traffic discomfort, increased fuel consumption and faster vehicle wear. Moreover, precipitation and accumulated water penetrate deeper into the pavement structure layers through these cracks, and this leads to a decrease of the bearing capacity of the pavement structure and significantly faster pavement deterioration. In order to ensure the durability of the pavement structure, it is necessary to select the bitumen, which is resistant to low temperature cracking, for the asphalt mixture production. A failure to do this results in the need for proper repair and maintenance of the low temperature cracks. Moreover, the repair and maintenance of the low temperature cracks require specific knowledge and special technologies, so this distress is often difficult to manage. Improperly repaired and maintained low temperature cracks result in a shortened pavement lifetime and increased costs for the users and managers of roads.

To efficiently use the funds allocated for the maintenance of roads and to ensure the required asphalt pavement performance without the formation and development of low

temperature cracks, it is necessary to create a bitumen selection algorithm designed for the evaluation of asphalt pavement resistance to low temperature cracking.

### **Relevance of the thesis**

Each developed country aims to have a sustainable, safe, comfortable and long-lasting road network, which is attractive to users. The importance of such a network is even more pronounced in the transit countries, where a major part of the gross domestic product (hereinafter, the “GDP”) is generated by road transport. In Lithuania, the GDP generated by road transport has been steadily growing during the last ten years, and it reached 9% in 2018. This value is the highest economic indicator generated by the road sector.

The continuously increasing need for freight and human mobility, and a continuous exceeding of critical stresses in asphalt pavements due to inappropriate selected bitumen, result in significantly faster pavement deterioration. The consequences of which have been particularly noticeable during recent years. In the case of a failure to take appropriate measures, many roads can gradually become unattractive to their users, and this will have negative effect on the country’s economy. In order to further maintain the high economic value to be generated by road transport, it is necessary to take actions that will ensure the asphalt pavement performance without distress during its designed lifetime. Therefore, the creation of measures designed for the evaluation of asphalt pavement resistance to low temperature cracking is a relevant and important direction for road research.

It should also be noted that no common system for the selection of bitumen and asphalt mixture, which could be applied universally, has so far been created. Moreover, after applying the bitumen and asphalt test methods and criteria that define the formation of low temperature cracks, these cracks are still often observed. Such an inaccurate evaluation of the performance of the bitumen and/or asphalt mixture at low temperatures by these methods has resulted from: the introduction of new types of bitumen (when creating the methods and criteria, such types of bitumen were not included in the research programme), in particular polymer modified bitumen; the determination of limiting values based on the limiting values of another method rather than on the actual asphalt pavement performance; insufficient repeatability and reproducibility of the test method; dependence of the results on the specimen geometry; the medium, which can be air, potassium acetate or ethanol, applied for the cooling (freezing) of the specimen, etc. Therefore, in order to create the algorithm purposed for the evaluation of asphalt pavement resistance to low temperature cracking, it is necessary to identify the most suitable test method for the bitumen or asphalt mixture and to determine the limiting values of the properties obtained by this method, based on the actual asphalt pavement performance.

### **Object of the thesis**

The object of the thesis is the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope considering the formation and development of low temperature cracks in asphalt pavements.

## **Aim of the thesis**

The aim of the thesis is to determine the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope considering the formation and development of low temperature cracks in the asphalt pavements.

## **Tasks of the thesis**

To achieve the goals of the thesis, the following tasks were set:

1. To create a theoretical algorithm designed for the evaluation of asphalt pavement resistance to low temperature cracking, based on a direct determination of the bitumen stress relaxation modulus, with the use of a dynamic shear rheometer and a sample with a diameter of 4 mm.
2. To determine the limiting values of the bitumen linear viscoelastic behaviour range through performing bitumen stress relaxation tests at negative temperatures.
3. To determine the severity of low temperature cracking in the selected road sections, and to perform tests on bitumen regenerated from the upper layer of these road sections with the use of a dynamic shear rheometer and a sample with a diameter of 4 mm taking into account the lowest surface temperature of the asphalt pavement determined during the operation of these sections.
4. To provide guidelines (principles) for the application of the created algorithm designed to select bitumen for the asphalt mixture production of the upper layer of asphalt pavement, with regard to the lowest surface temperature of the asphalt pavement.
5. To estimate the economic impact of the application of the algorithm based on the bitumen stress relaxation modulus and its slope, in comparison with the conventionally used bitumen selection method.

## **Research methodology**

The following methodologies were applied in this thesis: observations of the severity of low temperature cracking in the road sections and the lowest surface temperature of the asphalt pavement recorded during the operation of these sections; the time-temperature superposition principle; test methods for bitumen properties (limits of the linear viscoelastic behaviour range; as well as the bitumen stress relaxation modulus and its slope) at low temperatures and methods of mathematical statistics. Moreover, to evaluate the economic effect, a cost-benefit analysis was used.

## **Scientific novelty of the thesis**

When performing the research, the following results were obtained that are new and significant for civil engineering:

1. Having evaluated the severity of low temperature cracking, which predominantly occurs on the road sections depending on the age of the asphalt pavement, the asphalt mixture and the bitumen type, and considering the lowest surface temperature recorded on the asphalt pavements, the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope were determined with regard to the formation and development of low temperature cracks in the asphalt pavement.

2. Based on the research results, an algorithm was created to select an appropriate bitumen for asphalt mixture production and thereby ensure the asphalt pavement resistance to low temperature cracking. The algorithm is based on a direct determination of the bitumen stress relaxation modulus and its slope, with the use of a dynamic shear rheometer and a sample with a diameter of 4 mm

### **Practical value of the research findings**

The created algorithm, based on the bitumen stress relaxation modulus and its slope and purposed for the evaluation of asphalt pavement resistance to low temperature cracking, can be applied in practice to select an appropriate bitumen for asphalt mixture production. In this way, the performance of an asphalt pavement without the formation and development of low temperature cracks is ensured. The application of this algorithm could lead to about a 40% reduction in costs for the repair of low temperature cracks in asphalt pavements during a period of 30 years, in comparison with the conventionally used bitumen selection method.

A direct determination of the bitumen stress relaxation modulus and its slope by a dynamic shear rheometer with a 4-mm diameter specimen at low temperatures is significantly faster and more economical in comparison with the other bitumen and asphalt mixture test methods defining the formation of low temperature cracks in an asphalt pavement. Furthermore, the application of this method enables to characterise the bitumen behaviour within a full range of operational temperatures (at high, medium and low temperatures) using a single device – the dynamic shear rheometer.

### **Defended statements**

1. Through the application of the created algorithm, which is based on the bitumen stress relaxation modulus and its slope, it is possible to evaluate the asphalt pavement's resistance to low temperature cracking. The application of this algorithm to select an appropriate bitumen for asphalt mixture production allows to restrict the formation and development of low temperature cracks in the asphalt pavement.
2. The application of the algorithm, which is based on the bitumen stress relaxation modulus and its slope, to select bitumen for asphalt mixture production instead of the conventionally used bitumen selection method is economically beneficial considering the formation and development of low temperature cracks in the asphalt pavement.

### **Approval of the research findings**

13 scientific articles were published on the topic of the thesis: seven in scientific journals, included in the *Clarivate Analytics Web of Science* database, two in international *Conference Proceedings* of the *Clarivate Analytics* database, four in others publication of international conferences.

The results of the research conducted in this thesis have been published in five international conferences in Lithuania and abroad:

- International Conference „*CETRA 2016: 4<sup>th</sup> International Conference on Road and Rail Infrastructures*“ in 2016 in Šibenik;

- International Conference „*Transport Research Arena*“ in 2016 in Warsaw and in 2018 in Vienna;
- International Conference „*Environmental Engineering*“, in 2017 in Vilnius;
- International Conference „*Resilient and Safe Road Infrastructure*“, in 2018 in Kielce.

### **The structure of the thesis**

The thesis consists of an introduction, three chapters, general conclusions, recommendations, a list of references, a list of the author's scientific articles on the topic of the thesis and summary in English. There are also nine annexes.

Thesis consists of 129 pages, excluding annexes, 3 numbered formulas, 26 figures and 11 tables. 126 literature sources were used while writing the thesis.

### **Acknowledgments**

The author of the thesis is sincerely grateful to her scientific supervisor, Prof. Dr. Audrius Vaitkus, for his valuable scientific insights, patience and the time he devoted to scientific discussions during the preparation of the thesis, as well as for the opportunities for improvement in a scientific and working environment that he provided. The author also thanks Dr. Hilde Soenen for the scientific experience, knowledge and valuable scientific advice she shared during an internship at the University of Antwerp (Antwerp, Belgium). The author expresses her gratitude to the thesis experts for their valuable notes and comments on the thesis. Moreover, she is grateful to her colleagues at the Road Research Institute and Road Research Laboratory of Vilnius Gediminas Technical University for their overall support and assistance. The author also thanks the Research Council of Lithuania for the financial support it granted, as well as her family for their unlimited patience, support and understanding.

## **1. Analysis of test methods defining the formation of low temperature cracks in asphalt pavements**

Thermal cracks are divided into two types according to the causes of their formation (Shahin & McCullough, 1972):

- low temperature cracks that occur due to the one-time effect of a critical (low) temperature;
- thermal fatigue cracks that occur due to a repetition of many temperature cycles with big difference between the highest and lowest temperature on the asphalt surface.

The thesis deals only with the low temperature cracks that form as a result of the one-time effect of a low temperature. Therefore, there is a certain temperature limit that determines the asphalt pavement resistance to low temperature cracking. When this temperature is not exceeded in the asphalt pavement during its operations, low temperature cracks do not form. This temperature is called the “critical cracking temperature”. The bitumen and asphalt mixture test methods defining the formation of low temperature cracks have focused in particular on the determination of this temperature.

Scientists are continuously developing and improving the existing methods and criteria for evaluation of the bitumen's and/or asphalt mixtures' resistance to low temperature

cracking, as well as looking for new ones. The bitumen and asphalt mixture test methods defining the formation of low temperature cracks can be divided, according to the test method principles, into:

- continuum mechanics-based tests (for bitumen: Fraas test, bending beam rheometer test, direct bending test, extended bending beam rheometer test, asphalt binder cracking device test and dynamic shear rheometer with 4 mm parallel plate test; for asphalt mixture: indirect tensile test, bending beam rheometer test, thermal stress restrained specimen test and asphalt thermal cracking analyzer);
- fracture mechanics-based tests (for bitumen: single-edge notched bending and double-edge notched test; for asphalt mixture: single-edge notched beam test, semi-circular bending test, disc-shaped compact tension test, Fenix test and asphalt concrete cracking device test);
- acoustic emission-based tests.

The bitumen and asphalt mixture test methods based on continuum mechanics are the most-often applied in practice and the best assimilated test methods. It is assumed in them that low temperature cracks form when the thermal stresses in a material, which occur as a result of the low temperature effect, are higher than the tensile strength of that material. The test is performed using a continuous specimen, i.e. the specimen is formed without an initial crack (notch). However, the continuum mechanics-based test methods do not evaluate the development of low temperature cracks.

The development of fracture mechanics-based test methods for bitumen and asphalt mixtures has proved to be a suitable research direction seeking to evaluate the development of low temperature cracks (Hoare & Hesp 2000; Anderson *et al.* 2001; Kim *et al.* 2006). These test methods are used by applying notched specimens (with a pre-existing crack); therefore, cracks develop at the specimen's notch and the development of the crack (its opening) can be evaluated. According to the status of the stresses and strain at the crack's tip, there are three fracture modes (Javatilaka 1979): I – tension (opening); II – sliding (shear); and III – tearing (torsion). In bitumen and asphalt mixture specimens, the I (tension (opening)) fracture mode is imitated most often.

The bitumen and asphalt mixture test methods based on continuum and fracture mechanics are time-consuming and require specialist expensive testing equipment (deformation machines), which are not economically beneficial. Therefore, scientists have started looking for innovative, quick, simple and cost-effective test methods for bitumen and asphalt mixtures resistance to low temperature cracking. Acoustic emission-based methods designed for the testing of bitumen and asphalt mixtures have met the expectations of scientists (Apeagyei *et al.* 2009; Buttlar *et al.* 2011). These test methods are based on the sudden energy release that occurs during the opening of a crack. The energy spreads through the material from the crack site by mechanical waves that are recorded by special sensors secured onto the surface of the material (Maji *et al.* 1990). Such a test method allows to evaluate even the opening of microcracks (Behnia *et al.* 2010, Apeagyei *et al.* 2009).

The testing of asphalt mixtures is economically inefficient in comparison with bitumen tests, as the latter are less time-consuming, significantly less material is needed to produce the specimens and no additional equipment is necessary for the preparation of the specimens (e.g. compactor). Therefore, it is reasonable to control the formation and development of low temperature cracks in asphalt pavement through the testing of bitumen,



which is applicable for asphalt mixture production, and to apply the asphalt mixture test methods and criteria only in absence of reliable bitumen test methods and criteria defining the formation of low temperature cracks.

The dynamic shear rheometer with 4-mm parallel plates (4-mm DSR) test is currently one of the most promising bitumen test methods at low temperatures. The main advantage of this test method is the extremely low bitumen amount (25 mg) necessary to prepare one specimen. This is especially important for the testing of aged bitumen or of bitumen recovered from roads, as in this case a significantly lower volume of the aged bitumen or fewer drilled asphalt samples (cores) are needed to obtain the necessary amount of testing material. It should be noted that the less damage is made to an asphalt pavement during its lifetime, the more likely it is that the pavement will perform without distress during its designed lifetime. Moreover, the 4-mm DSR test is a universal bitumen test method, as testing can be performed in a wide range of temperatures, frequencies, stresses or strains. A universal application of this method would enable the characterisation of bitumen behaviour at high ( $\geq 46$  °C), medium (4–40 °C) and low ( $\leq 0$  °C) temperatures using a single device – the dynamic shear rheometer – as currently, bitumen performance at high and medium temperatures is already tested by a dynamic shear rheometer with the use of 25-mm and 8-mm diameter specimens, respectively.

However, in the application of the 4-mm DSR test, scientists face certain challenges, such as maintaining the testing temperature of the specimen, the preparation of a sample with an extremely small diameter (4 mm), the positioning of the sample between two parallel plates, etc. Moreover, the methodology for the determination of the bitumen stress relaxation modulus and its slope, which was suggested by Sui *et al.* (2011), is based on an indirect determination of characteristics, i.e. the bitumen storage modulus is initially determined by the 4-mm DSR test at different temperatures and frequencies; and then, based on the obtained results, a master curve of the storage modulus is made, which is finally interconverted into a master curve of the bitumen stress relaxation modulus, from which the value of the bitumen stress relaxation modulus and its slope at 60 s is determined. All of this leads to a discussion regarding the repeatability and reproducibility of the 4-mm DSR test results.

The correlation between the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope applied in practice and the actual severity of the low temperature cracking in an asphalt pavements is also questionable and debatable, as the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope suggested by Sui *et al.* (2011), Farrar *et al.* (2015) and Riccardi *et al.* (2017b) are based on the limiting values of the flexural creep stiffness and m-value (the bending beam rheometer test). The latter were determined at the end of the 20th century analysing non-modified bitumen. At present, modified bitumen is most often used for asphalt mixture production, especially for the asphalt wearing course, which is most sensitive to the formation of low temperature cracks. At the end of the 20<sup>th</sup> century, modified bitumen was not taken into account when determining the limiting values of the flexural creep stiffness and m-value, as this material was not available on the market and its application was minimal. A number of research studies have shown that the application of the limiting values of the flexural creep stiffness and m-value for modified bitumen often do not protect the asphalt pavement from the formation of low temperature cracks (Dongré *et al.* 1997; Kluttz & Dongré 1997; Bouldin *et al.* 1999; Hesp

2004; Iliuta *et al.* 2004; Hesp *et al.* 2009a, 2009b). All of this justifies the need to determine the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope, based on the actual performance of an asphalt pavement.

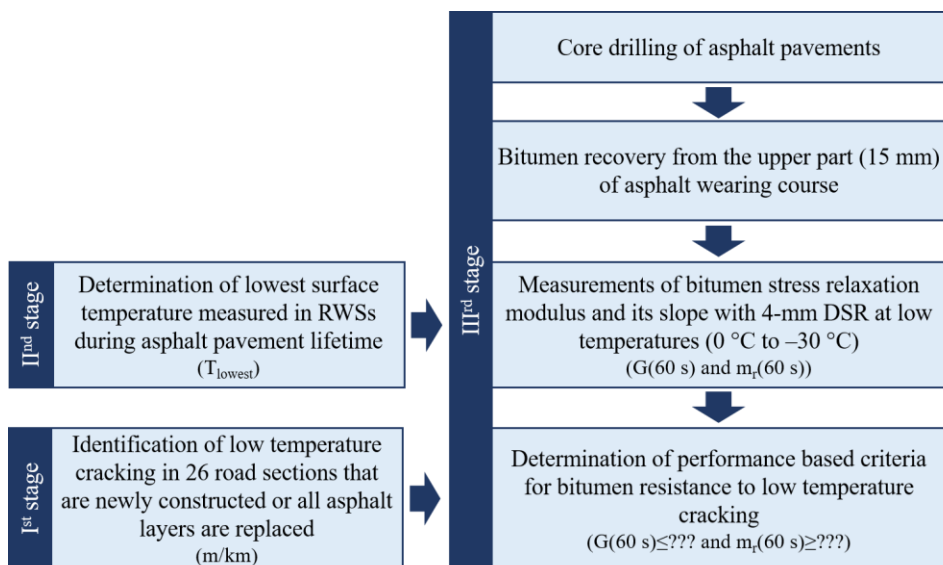
## **2. Theoretical algorithm for the evaluation of asphalt pavement resistance to low temperature cracking and experimental research for its validation**

The advantages of the 4-mm DSR method and the reliability and repeatability of the results, which was proved by Gražulytė *et al.* (2019), justifies the preference of its application over other bitumen test methods that define the formation of low temperature cracks. Moreover, the dynamic shear rheometers currently available on the market can instantly create a desired strain in the specimen and maintain it for an intended period. Therefore, the bitumen stress relaxation modulus can be determined directly, i.e. without an interconversion of the master curve of the storage modulus into the bitumen stress relaxation modulus. Based on this, a theoretical algorithm for the evaluation of asphalt pavement resistance to low temperature cracks has been created based on the bitumen stress relaxation modulus and its slope. In the algorithm, the bitumen stress relaxation modulus and its slope are determined through the bitumen stress relaxation test at low temperatures, with the use of the dynamic shear rheometer and the application of a 4-mm diameter specimen. The algorithm includes the following steps:

1. Selection of the bitumen to be tested.
2. Ageing of the bitumen, following the requirements of the LST EN 12607-1:2015 and LST EN 14769:2012 standards;
3. Preparation for tests using the dynamic shear rheometer and a 4-mm diameter specimen (checking the temperature between the parallel plates (calibration), determination of the rheometer radial compliance and inertia of the motor and measuring system);
4. Determination of the linear viscoelastic behaviour range of the tested bitumen;
5. Direct determination of the bitumen stress relaxation modulus and its slope through the bitumen stress relaxation test conducting it at least at two low temperatures;
6. Determination of the critical test temperature of bitumen, in accordance with the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope;
7. Determination of the critical cracking temperature;
8. Checking whether the determined critical cracking temperature is not higher than the lowest surface temperature of asphalt pavement recorded in the region where the application of the bitumen is foreseen.

In order to use the created algorithm, it is necessary to determine the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope, based on the actual performance of asphalt pavements with respect to the formation and development of low temperature cracks. Moreover, while determining the limiting values, it is necessary to take into account the lowest surface temperature of asphalt pavement that has been recorded during the operation of the roads. For that purpose, an experimental research was carried out using the equipment of the Road Research Laboratory of the Road Research Institute of

the Faculty of Environmental Engineering of Vilnius Gediminas Technical University. The scheme of the experimental research is provided in Figure S.2.1.



**Fig. S.2.1.** Scheme of the experimental research

During the first stage, in the autumn of 2017 and the spring of 2018, the severity of low temperature cracking and the distance between cracks were determined in 26 road sections, which were newly constructed or in which all the asphalt layers had been rebuilt during their rehabilitation. During the second stage, the lowest surface temperature of the asphalt pavement recorded during the operation of these road sections, which was critical and led to the formation and development of low temperature cracks in the asphalt pavement, was determined. During the third stage, drilled asphalt samples (cores) were taken from these road sections and the bituminous binder from the upper part of asphalt wearing course with a thickness of 15 mm was recovered. For the recovered bitumen, the bitumen stress relaxation modulus and its slope were determined in a direct way using the dynamic shear rheometer with 4-mm diameter plates in the linear viscoelastic behaviour range, which had been determined during the second stage, and with consideration of the lowest surface temperature of the asphalt pavement. Based on the obtained values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope at 60 s and the severity of the low temperature cracking determined during the first stage, the values of the stress relaxation modulus and its slope limiting the formation and development of low temperature cracks in the asphalt pavement were determined. Having evaluated the obtained limiting values, the theoretical algorithm for the evaluation of the asphalt pavement's resistance to low temperature cracking was revised. The final algorithm, based on the bitumen stress relaxation modulus and its slope, ensures the asphalt pavement's

resistance to the formation and development of low temperature cracks. Moreover, the economic effect of the application of this algorithm was estimated, in comparison with the conventionally used bitumen selection method.

### **3. Application of the algorithm based on bitumen stress relaxation modulus and its slope purposed for evaluation of asphalt pavement resistance to low temperature cracking**

Based on the results of the severity of low temperature cracking determined in the analysed road sections in the spring of 2018 and results of the stress relaxation modulus and its slope determined for the recovered bitumen of the asphalt samples (cores) taken from these sections at a temperature higher by 10 °C than the lowest surface temperature of the asphalt pavement recorded during the operation of the those sections, graphs for the distribution of the bitumen stress relaxation modulus and its slope were made depending on the severity of low temperature cracking. Whereas the operation of the DST111 (Vaisala) remote sensors equipped in the Road Weather Stations (RWSs) calibration and a comparison of the recorded data with the actual asphalt pavement temperature at the moment of reading the sensor data are not performed, the accuracy of the temperature recorded by these sensors is questionable. Therefore, in order to evaluate the impact of a potentially inaccurately measured temperature in the RWSs to the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope, which define the formation and development of low temperature cracks in asphalt pavement, additional bitumen stress relaxation tests were performed with the assumption that the lowest surface temperature of the asphalt pavement recorded in the RWSs was lower by 3 °C than the determined one. Such a deviation was chosen by taking into account the deviations characteristic of infrared sensors, as there is no actual data on the deviation of the temperature recorded by the DST111 (Vaisala) remote sensor from the actual surface temperature of the asphalt pavement.

Additional bitumen stress relaxation tests were performed on nine road sections, where the values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope were near the initial limiting values. Fig. S.3.1 and Fig. S.3.2, respectively, show the revised limiting values of the bitumen stress relaxation modulus with regard to the formation and development of low temperature cracks in the asphalt pavement, taking into account that the lowest surface temperature of asphalt pavement may have potentially been inaccurately measured in the RWSs. Therefore, the formation and development of low temperature cracks is limited when the bitumen stress relaxation modulus at 60 s is not higher than 52 MPa and its slope is not lower than 0.370 at a temperature higher by 10 °C than the lowest surface temperature of the asphalt pavement recorded in the bitumen application region. Exceeding at least one limiting value can lead to low temperature cracking with a severity higher than 12 m/km (in a 9 m width of the asphalt pavement). Determined limiting values evaluate a deviation of -3 °C in the temperature recorded by the DST111 (Vaisala) remote sensor in the RWSs. However, this deviation must be specified by performing additional tests.

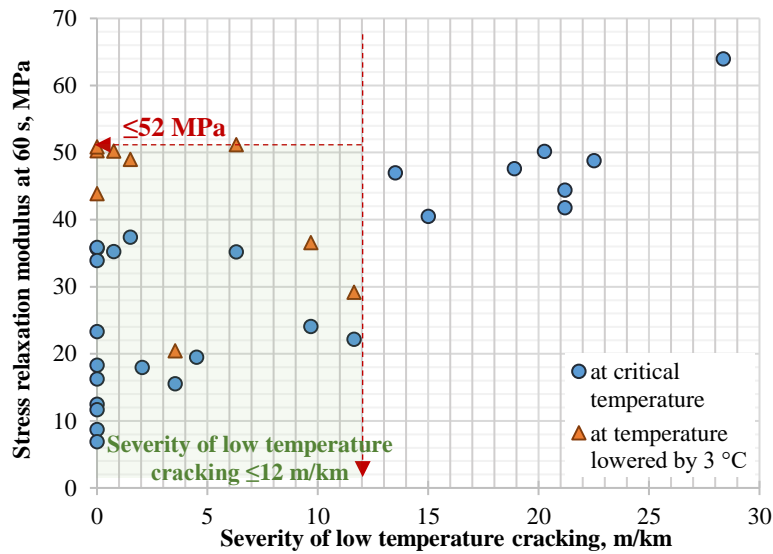


Fig. S.3.1. Revised limit (criterion) of stress relaxation modulus to prevent and minimize development of low temperature cracks

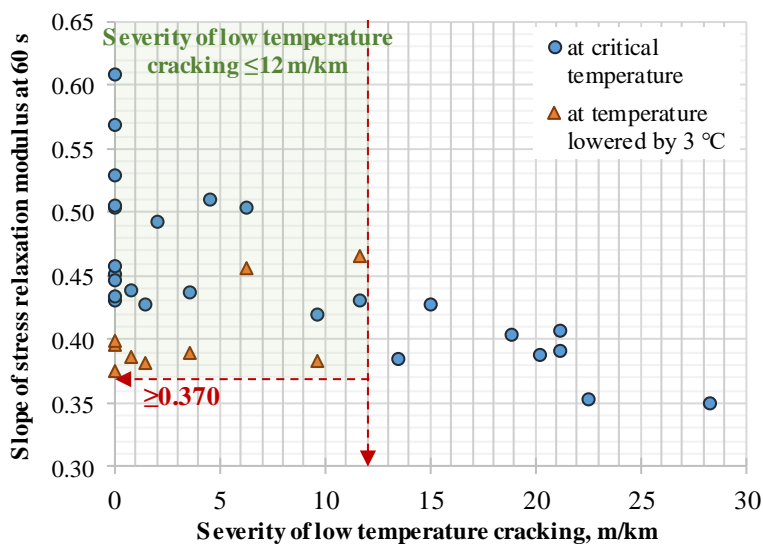
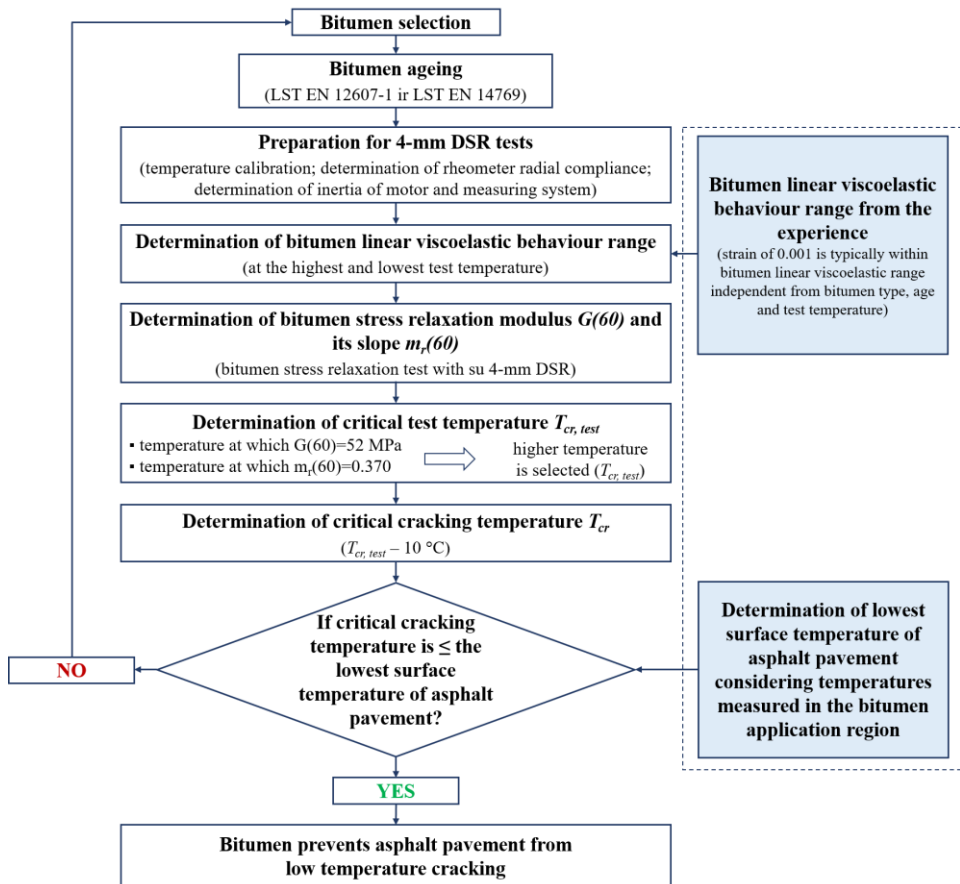


Fig. S.3.2. Revised limit (criterion) of slope of stress relaxation modulus to prevent and minimize development of low temperature cracks

Fig. S.3.3 shows the algorithm based on the bitumen stress relaxation modulus and its slope purposed for evaluation of asphalt pavement resistance to low temperature cracking, which was revised based on the results of the experimental research. In order to use the algorithm, first of all the bitumen is chosen, which later is aged by the short-term (RTFOT) and long-term (PAV) ageing method following the requirements of the LST EN 12607-1:2015 and LST EN 14769:2012 standards.



**Fig. S.3.3.** Algorithm based on bitumen stress relaxation modulus and its slope to assess asphalt pavements resistance to low temperature cracking

Prior to the start of the aged bitumen tests by the dynamic shear rheometer with 4-mm diameter plates, checking and calibration of the temperature between the upper and lower plates is performed according to the methodology provided by the manufacturer of the device (Anton Paar 2018). A calibrated temperature setting kit consisting of a 25-mm diameter circular temperature sensor and a digital meter was used. The temperature checks

and calibration has to be performed at least once every six months. Also, the rheometer radial compliance, which evaluates a transmission of the angular deflection applied at the optical encoder to the device components, has to be determined. The rheometer radial compliance is determined by using the 4-mm diameter plates according to the method provided by the manufacturer of the device (Anton Paar 2014) and/or the method recommended by Farrar *et al.* (2015). The rheometer radial compliance also has to be determined at least once every six months. Moreover, every day, prior to carrying out the tests by the dynamic shear rheometer, the inertia of the motor and measuring system (4-mm diameter plates) is determined.

The bitumen performance with the dynamic shear rheometer has to be tested in the linear viscoelastic behaviour range; therefore, it is necessary to determine these limits through carrying out a sequence of bitumen stress relaxation tests while testing a newly prepared specimen each (the method of the preparation of the specimens is provided in the article by Gražulytė *et al.* (2019)) at different (each time higher) strain levels. A stress relaxation test sequence is carried out at the highest and lowest test temperatures of the temperature range foreseen for the tests. If the difference between the highest and lowest temperatures foreseen for the tests is less than 6 °C, the stress relaxation test sequence is carried out at the lowest temperature foreseen for the tests. The determination of the limits of the bitumen linear viscoelastic behaviour range by carrying out the bitumen stress relaxation test sequence with increasingly higher strains is time-consuming; therefore, the algorithm has an alternative – a selection of the limits of the bitumen linear viscoelastic behaviour range based on the experience. The bitumen linear viscoelastic behaviour range tests that have been already performed and the analyses of the obtained results show that a strain of 0.001 ensures the bitumen performance in the linear viscoelastic behaviour range, regardless of the bitumen type, age and test temperature (when the test temperature ranges from 0 °C to –20.0 °C).

The bitumen stress relaxation modulus and its slope is determined through the stress relaxation test with a duration of 108 s at a constant strain. The strain is chosen by taking into account the limits of the linear viscoelastic behaviour range determined in the previous step of the algorithm, or based on the experience. The test has to be carried out at not less than two different temperatures, differing from each other by not more than 6 °C. The test temperature is changed, i.e. increased or reduced, in steps not bigger than 6 °C until the value of the bitumen stress relaxation modulus and its slope at 60 s at the temperature  $T$  °C is respectively lower than 52 MPa and higher than 0.370 and at the temperature  $(T-6)$  °C is respectively higher than 52 MPa and lower than 0.370. In calculation of the bitumen stress relaxation modulus slope, which is the first derivative of the bitumen stress relaxation modulus function, the data is not analysed (not included into the bitumen stress relaxation modulus function) when the foreseen strain is not achieved.

The critical test temperature of the bitumen is defined by a higher temperature when the value of the bitumen stress relaxation modulus at 60 s is equal to 52 MPa or the value of the bitumen stress relaxation modulus slope at 60 s is equal to 0.370. Both temperatures are calculated using the method of interpolation, according to the requirements of the ASTM C670–15 standard, while interpolating between the two nearest temperatures at which a higher and lower value of the bitumen stress relaxation modulus and its slope than their limiting values were determined.

The critical cracking temperature of the bitumen, i.e. the lowest surface temperature of an asphalt pavement at which low temperature cracks do not form, or their number is minimal (up to 12 m/km assuming that the width of the pavement is 9 m), is received upon the reduction of the critical test temperature by 10 °C. For example, having determined the critical test temperature as 13 °C, the critical cracking temperature is  $(-13 - 10 = -23)$  °C, i.e. if the surface temperature of the asphalt pavement is not lower than -23 °C, low temperature cracks do not form in the asphalt pavement or their number is minimal (up to 12 m/km, assuming that the width of the pavement is 9 m).

In order to evaluate whether the tested bitumen limits the formation and development of low temperature cracks in the asphalt pavement, the critical cracking temperature is compared to the lowest surface temperature of the asphalt pavement recorded in the foreseen location of the application of the tested bitumen during a period of 10–30 years. The lowest surface temperature of the asphalt pavement is determined by analysing the lowest surface temperatures of the asphalt pavement recorded by the RWSs in the bitumen application location. It is recommended that the data for a period of at least the 10 most recent years should be analysed.

When comparing the critical cracking temperature with the lowest surface temperature of the asphalt pavement, it is assumed that the tested bitumen will ensure the asphalt pavement performance without low temperature cracks, or that their severity will be minimal (Table S.3.1), if the critical cracking temperature is lower than the lowest surface temperature of the asphalt pavement. Otherwise, i.e. if the critical cracking temperature is higher than the lowest surface temperature of the asphalt pavement, another bitumen must be selected for the test, and all steps of the algorithm must be repeated from the very beginning.

**Table S.3.1.** Severity of low temperature cracking depending on road width as a result of algorithm usage

Road (lanes + shoulders) width, m	Severity of low temperature cracking when we use algorithm, m/km
14.75	$\leq 20$
11.50	$\leq 15$
11.25	$\leq 15$
10.00	$\leq 13$
9.00	$\leq 12$
8.00	$\leq 11$
7.75	$\leq 10$
7.00	$\leq 9$
6.00	$\leq 8$
4.50	$\leq 6$
3.50	$\leq 5$

The calculation of the economic effect using the cost-benefit analysis method showed that the application of the algorithm in Lithuania to select the bitumen for an asphalt mixture production is attractive (with an internal rate of return 7.7% and benefit-cost ratio of 1.5). It would lead to costs lower by 38.4% for low temperature crack repairs over



a period of 30 years, in comparison with the conventionally used bitumen selection method and taking into account the market adaptations to changed conditions. However, it must be noted that the economic effect provided by the application of the algorithm could differ, depending on the country of its application.

## General conclusions

1. The created theoretical algorithm, designed to evaluate asphalt pavement resistance to low temperature cracking, is based on a determination of the bitumen critical cracking temperature with reference to the limiting values of the bitumen stress relaxation modulus and its slope at 60 s. The theoretical algorithm includes a direct determination of the bitumen stress relaxation modulus and its slope through performing the bitumen stress relaxation test with the use of a dynamic shear rheometer and a 4-mm diameter specimen at not less than two low temperatures.
2. It has been proved that a gradual deformation of the specimen cannot be applied for the determination of the limiting values of the linear viscoelastic behaviour range by the bitumen stress relaxation test as, immediately after the first loading, residual deformations form in the specimen. Therefore, the limiting values of the bitumen linear viscoelastic behaviour range have to be determined through performing repeated bitumen stress relaxation tests with a newly prepared specimen for deformation level (value). The limit of the linear viscoelastic behaviour range of bituminous binders at low temperatures is determined by a sudden disintegration (fracture) of the specimen, leading to a significantly (more than 3 times in comparison with the average of measured values) lower value of the bitumen stress relaxation modulus at 60 s regardless of the test temperature ( $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$  or  $-15^{\circ}\text{C}$ ) and the type of the bituminous binder. Such a performance of the bituminous binder (a sudden disintegration (fracture) of the specimen) is not typical at high ( $\geq 46^{\circ}\text{C}$ ) or medium (from  $4^{\circ}\text{C}$  to  $40^{\circ}\text{C}$ ) test temperatures.
3. The performed analysis of the relationship between the bitumen stress relaxation modulus and its slope at 60 s and the severity of low temperature cracking in asphalt pavements of selected road sections has shown that the formation and development of low temperature cracks in asphalt pavements is limited when the stress relaxation modulus of the bitumen used for the asphalt mixture production of the upper asphalt pavement layer and its slope at 60 s is not higher than 52 MPa and not lower than 0.370, respectively, at a temperature higher by  $10^{\circ}\text{C}$  than the lowest surface temperature of the asphalt pavement recorded in the location of the bitumen's application. The exceeding of at least one limiting value leads to the formation of low temperature cracks.
4. The revised algorithm according to the experimental test results is designed to select the bitumen for the asphalt mixture production of the upper layer of asphalt pavement irrespective of the type of the foreseen construction (new construction, repair, rehabilitation or reconstruction). The suggested algorithm limits the formation and development of low temperature cracks in the asphalt pavement only when the determined critical cracking temperature of the bitumen is not higher than the lowest surface temperature of the asphalt pavement.

5. Having estimated the economic effect, it has been determined that the application of this algorithm will result in a 40% lower cost for the repair of low temperature cracks over a period of 30 years, in comparison with the conventionally used bitumen selection practice. The significance of the algorithm application at the national level has been proved by the calculated indicators of the cost-benefit analysis: internal rate of return – 8%, benefit-cost ratio – 1.5).

## Recommendations

1. It is recommended that the bitumen resistance to the formation and development of low temperature cracking should be evaluated according to the bitumen stress relaxation modulus and its slope at 60 s, while carrying out the stress relaxation test with a dynamic shear rheometer with a 4-mm diameter specimen at low temperatures and determining the critical cracking temperature. The application of this method would enable the characterisation of the bitumen behaviour in the full range of operational temperatures using a single device – the dynamic shear rheometer.
2. It is recommended that the Lithuanian Road Administration under the Ministry of Transport and Communications should supplement the regulatory technical document “Rules for Asphalt Layers Construction” CR ASPHALT 08 with the requirement for the mandatory determination of the critical cracking temperature following the created algorithm when carrying out control tests of the bitumen applied for the asphalt mixture production for asphalt wearing course. The determined critical cracking temperature of the bitumen should be declared. This would allow to collect the information on the bitumen available on the market resistance to low temperature cracking.

---

## Priedai<sup>3</sup>

**A priedas.** Tiriamųjų kelių ruožų sąrašas

**B priedas.** Temperatūrinių plyšių intensyvumas ir atstumas tarp jų tiriamuosiuose kelių su asfalto danga ruožuose

**C priedas.** Kritinės temperatūros asfalto dangų paviršiuje

**D priedas.** Bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio ribų nustatymo rezultatai

**E priedas.** Bitumo įtempių relaksacijos modulio ir jo kitimo rodiklio nuokrypių įtakos žemiausiai kritinei temperatūrai analizė

**F priedas.** Žemiausios asfalto dangos paviršiaus temperatūros, užfiksuotos kelių oro sąlygų stotelėse 2003–2018 m.

**G priedas.** Autorės sąžiningumo deklaracija

**H priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo disertacijoje

**I priedas.** Mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

---

<sup>3</sup> Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Judita GRAŽULYTĖ

BITUMO ĮTEMPIŲ RELAKSACIJOS MODULIO  
TAKYMAS ASFALTO DANGŲ ATSPARUMUI  
TEMPERATŪRINIAMS PLYŠIAMS VERTINTI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
Statybos inžinerija (T 002)

BITUMEN STRESS RELAXATION MODULUS  
AS AN INDICATOR OF ASPHALT PAVEMENTS  
RESISTANCE TO LOW TEMPERATURE CRACKING

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Civil Engineering (T 002)

2019 11 15. 12,5 sp. l. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto  
leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino BJ UAB „Baltijos kopija“  
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius